

PÁGINAS PARA UNA HISTORIA DE LAS  
COMUNICACIONES ÓPTICAS Y LA  
FOTÓNICA

J.A. MARTÍN PEREDA

*Departamento de Tecnología Fotónica  
ETS. Ingenieros de Telecomunicación  
Universidad Politécnica de Madrid*

Madrid, mayo 2001

## A MODO DE JUSTIFICACIÓN

Las páginas que siguen son el resultado de una parte del curso ***"Fundamentos Electrónicos de las Comunicaciones"*** que los Departamentos del Área de "Tecnología Electrónica" de esta Escuela llevan impartiendo, con carácter de asignatura Optativa, durante los últimos tres años. El material recogido a lo largo de estos años se ha ido acumulando en una larga serie de transparencias que están esperando adquirir la forma de un breve texto escrito. Antes de que esto se convierta en realidad he creído conveniente hacer un pequeño ensayo con el presente fascículo. En él he recogido parte de las antedichas transparencias y algunos capítulos ya parcialmente concluidos.

El material, como un todo, es bastante heterogéneo. Su contenido se centra en la parte que me correspondía en el curso: la relacionada con las Comunicaciones Ópticas y la Fotónica. Una parte, la que se refiere a la historia de los primeros láseres de semiconductor, si no concluida, si está ya parcialmente delimitada. Es la primera que he escrito porque de ella hay muy poco en los libros más usuales. Otra parte, la correspondiente al inicio de las comunicaciones ópticas, está escrita pero solo como borrador. Falta todavía mucho para que pueda considerarse algo definitivo. El resto está constituido por parte de las transparencias que he venido usando; su apoyo es más gráfico que escrito. De ellas deberá generarse un texto más completo.

Agradezco a todos los que me han hecho decidirme a sacar a la luz las páginas que siguen. Si por mí hubiera sido, hubiera esperado hasta concluir las. Pero quizás eso hubiese conducido a que jamás vieran la luz.

## ÍNDICE

- 1.- Las primeras Comunicaciones Ópticas
  - 1.1.- Prehistoria
  - 1.2.- El telégrafo óptico de Claude Chappe
  - 1.3.- Telégrafo óptico de A. Edelcrantz
  - 1.4.- La telegrafía óptica en España
    - 1.4.1.- Telégrafo óptico de A. de Betancourt
    - 1.4.2.- Telégrafo óptico de J.M. Mathé
  - 1.5.- Antecedentes directos: primeros dispositivos fotónicos
  - 1.6.- Sistema de telefonía óptica de N.R. French
- 2.- Visiones y desarrollos previos al nacimiento del láser
  - 2.1.- H.G. Wells
  - 2.2.- Planck, Einstein y el cuerpo negro
  - 2.3.- El radar
  - 2.4.- Antecedentes del máser
  - 2.5.- El máser: C.H. Townes. Basov y Prokhorov
  - 2.6.- El máser: otros nombres
- 3.- El láser
  - 3.1.- Nacimiento del láser: T.H. Maiman
  - 3.2.- Otros láseres: Javan, Sorokin y Patel
  - 3.3.- Desarrollos surgidos del láser: la holografía de Gabor
- 4.- Transmisión de luz a través de un medio confinado
  - 4.1.- Transmisión de láser a través de guías
  - 4.2.- Nacimiento de la fibra óptica: C.K. Kao
- 5.- Emisión de luz en semiconductores
  - 5.1.- Antecedentes: Round y Losev
  - 5.2.- Propuestas previas: J. von Neumann y otros
  - 5.3.- Los tres primeros láseres de semiconductor
    - 5.3.1.- El láser de General Electric
    - 5.3.2.- El láser de IBM
    - 5.3.3.- El láser de los Lincoln Labs.
  - 5.4.- Aportaciones de N. Holonyak
  - 5.5.- El láser de heterounión
  - 5.6.- Z. Alferov

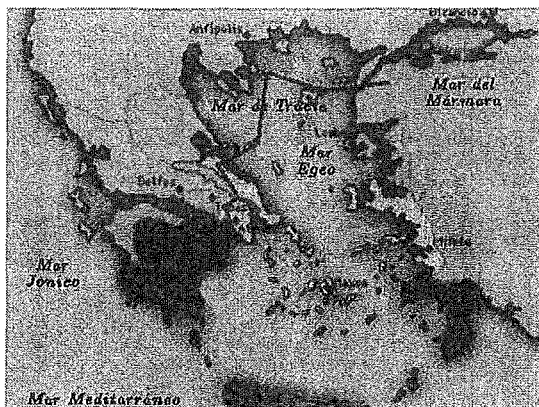


## 1.1 PREHISTORIA DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

Es ya una costumbre muy extendida empezar la historia de las Comunicaciones Ópticas con el anuncio de la caída de Troya. Casi al principio del "Agamenón" (Fig. 1), la primera tragedia de la "Orestiada", Esquilo narra, en un largo parlamento, cómo la reina Clitemnestra cuenta al corifeo la forma por la que ha tenido noticia de la caída de Troya. A lo largo de más de sesenta versos va describiendo el paso de una señal de fuego, que se había ido propagando por medio de hogueras, desde el Ida hasta los palacios del Átrida. El el Apéndice adjunto puede verse el texto completo de dicho pasaje. Todos los puntos que señala pueden reconocerse con una cierta facilidad. Aunque muchos de los nombres que aparecen no son los que tienen en la actualidad, es sencillo localizarlos. Todos ellos se corresponden con la cima de montes situados uno a continuación de otro o con enclaves situados en llanuras desde los que es posible distinguir la cumbres de los montes próximos. Desde cada uno de esos lugares es posible atisbar al previo y al posterior. Se establece así una cadena de receptores y transmisores, muy

**Figura 1.-** Máscara de oro del siglo VI a.d.C, encontrada en Micenas por H. Schliemann y conocida como "máscara de Agamenón".

similar a lo que sería una serie de estaciones repetidoras para un sistema de comunicaciones de nuestros días. El trazado completo de la transmisión aparece en la Fig. 2. Como puede apreciarse, hay tramos que van por tierra y tramos que van sobre el mar. Las condiciones de transmisión no serían así equivalentes en unos y otros. En los últimos años se han hecho algunos estudios sobre las características de este enlace y se ha visto que es potencialmente posible. Esto implica que lo que narra Esquilo pudo haberse llevado a cabo. El perfil del trazado puede verse también en la Fig. 3. La separación entre "repetidores" oscilaba entre unos veinte kilómetros y



**Figura 2.-** Trazado de la transmisión de señales luminosas entre Troya y Atenas, de acuerdo con lo descrito por Esquilo.

alrededor de cien. Los puntos en los que situaban las hogueras eran, como se ha señalado antes, o la cima de montes, alguno de los cuales llegaba a alcanzar casi 2000 metros, o el centro de llanuras desde el que era posible observar las cumbres de los montes próximos.

Es seguro que antes, en pueblos y grupos mucho más primitivos, se habrían empleado técnicas similares para transmitir situaciones equivalentes mediante convenios acordados previamente. Quizás, si debe mencionarse el caso de Troya es por la gran distancia que fue cubierta y, ya con la mentalidad de hoy, porque en esa

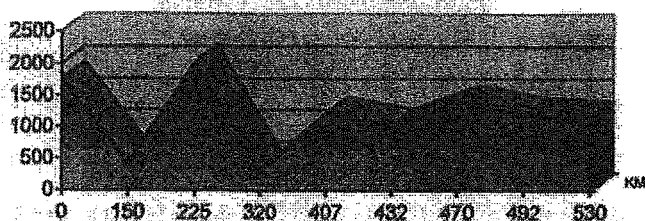


Figura 3.- Perfil del enlace de la Figura 2.

transmisión se usaron algunos de los conceptos que empleamos en nuestros días: regeneración de señales, transmisión digital y repetidores. A pesar de ello, esta comunicación no debería ser conceptuada como tal, dado que solo lo era de algo que previamente había sido acordado: únicamente se encenderían hogueras cuando Troya hubiera caído. Esa era la única información enviada. No se decía, por ejemplo, ni cuántos muertos se habían producido ni qué botín se había obtenido. Desde un punto de vista real, solo tiene sentido hablar de comunicaciones cuando la información que se transmite es más que la simple confirmación o negación de algo que se espera. Y esto necesita algo más que la recepción de un bit, como era el caso contado por Esquilo. Solo la escritura ha satisfecho ese principio antes de la presencia de los modernos sistemas de comunicación, aparte claro es, de la palabra. La comunicación entre barcos, por ejemplo, se basaba en la disposición, convenida de antemano, de una serie de banderas desplegadas de unas determinadas formas y que se traducían en un cierto mensaje, también pactado previamente. Las señales de humo, clásicas en la viejas películas del Oeste, por las que los indios transmitían sus mensajes, o los reflejos de rayos de sol sobre espejos en manos de los buscadores de oro, tenían también las mismas características. No existía la posibilidad de enviar información sobre algo que no se conociese de antemano. No pueden, por ello, designarse como verdaderas comunicaciones ópticas. Aunque fueran señales de luz lo que se emplease y aunque transmitiesen un cierto tipo de información.

Es interesante señalar también otra referencia, desde una perspectiva más próxima a nosotros que, de igual manera, tuvo que ver con la transmisión de noticias por procedimientos ópticos. W.D. Smithers<sup>1</sup>, describe el hecho de que "advisadores" (sic) mejicanos eran capaces de enviar largos y complicados mensajes mediante el simple uso de espejos de bolsillo y rayos de sol reflejándose en los mismos. Smithers especula con la posibilidad de que esta misma técnica fuese empleada por los aztecas

<sup>1</sup> W.D. Smithers, "Chronicles of the Big Bend". Madrona Press. Austin. USA. 1976.

para notificar a Moctezuma la llegada de Hernán Cortés a Veracruz, población que se encontraba entonces a una distancia de cuatro días de viaje de la capital.

En cualquier caso, hablar de Comunicaciones Ópticas con las herramientas que se han mencionado hasta aquí, es algo bastante alejado de la realidad. Por ello, aunque podrían citarse muchos otros casos equivalentes, no parece procedente seguir con ellos. Para llegar a las verdaderas primeras comunicaciones ópticas es preciso dar un salto en el tiempo y llegar hasta finales del siglo XVIII.

## 1.2.- EL TELÉGRAFO ÓPTICO DE CLAUDE CHAPPE

Las verdaderas comunicaciones ópticas nacieron, al menos con el concepto expresado, con el telégrafo óptico de Claude Chappe. La Revolución Francesa, al mismo tiempo que daba lugar a una serie de ideas que hoy seguimos teniendo alrededor, también fue un incentivo de la capacidad creadora en casi todos los campos de la ciencia y la tecnología. El historiador inglés Thomas Carlyle, en su "Historia de la Revolución Francesa"<sup>2</sup> (Apéndice II), narró cuarenta años después lo que significó la invención de Chappe. Describe cómo desde el parque de Vincennes, del de Lepelletier Saint-Fargeau y desde los altos de Écouen, se habían levantado una serie de construcciones sobre las que se situaban unos postes articulados que se movían, *"in the most rapid mysterious manner"*, para transmitir señales. Es un *"Device ... worthy of the Republic"* dice Carlyle. Y cuenta cómo, gracias a este invento, desde la sala de sesiones de las

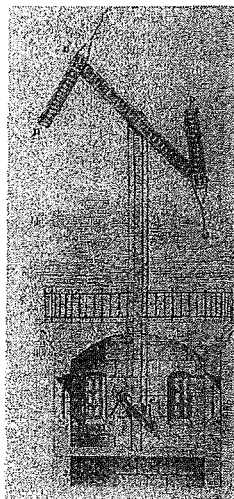
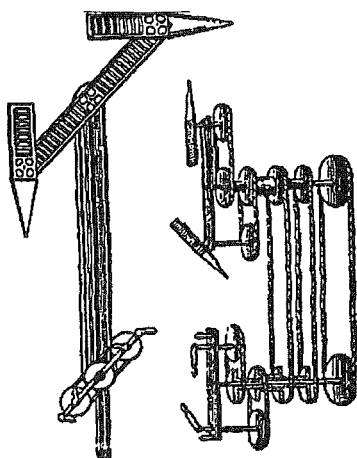


**Figura 4.-** Claude Chapp (1763 -1805 )



**Figura 5.-** Principales líneas de telegrafía óptica desplegadas en Francia en el siglo XIX.

Tullerías se transmitió la orden de que la ciudad de Conté pasara a llamarse Nord-Libre una vez había sido tomada por las fuerzas leales a la República. Antes de que hubiera pasado media hora, la respuesta llegaba y anunciaba al Ciudadano Presidente que la orden había sido cumplida. La firma era de Chappe. El nombre que recibía el invento era el griego de "telégrafo", "el que escribe lejos", "*Télégraphe sacré*" puede leerse en Carlyle. Cuando ahora decimos telégrafo damos por supuesto que es eléctrico. Pero el primero no fue eléctrico, sino óptico. Según parece, la primera propuesta de nombre por parte de Chappe para su sistema, fue la de "Tachygraphe",



**Figura 6.-** Estructura interna del telégrafo óptico de Chappe y su situación en un edificio público.

"el que escribe deprisa". Dado que el nombre no se ajustaba realmente a las características del proceso, pronto se sustituyó por el que hoy conocemos. Años después, Alejandro Dumas en "El Conde de Montecristo" aprovechaba también las propiedades del sistema de Chappe para darle algunas ventajas a su protagonista sobre sus adversarios. Pero esa es otra historia.

Las características del telégrafo de Chappe son bien conocidas. Tras la propuesta formal a la Asamblea Legislativa, el 22 de marzo de 1792, las primeras torres se instalaron en 1793 y llegaron a cubrir los 230 kilómetros que separan París de Lille. Un mástil fijo soportaba dos piezas móviles con las que se podían adaptar 98 configuraciones diferentes. Dada su lentitud, no permitía emplear transmisión alfabética por lo que requería una codificación cifrada. Parece que para alcanzar la distancia de París a Lille se invertía algo menos de 30 minutos, lo que quiere decir que la velocidad de transmisión era de entre 3 y 4 caracteres por minuto. A finales 1799 había unas 150 estaciones de telegrafía óptica en servicio, que se ampliaron cuando Napoleón Bonaparte tomó el poder. La más larga, de París a Milán, cubría 720 kilómetros y pasaba por Dijon, Lyon y Turín. Casi toda Francia se encontraba, a principios del siglo XIX, cubierta por líneas ópticas, al menos en sus ejes principales.

<sup>2</sup> T. Carlyle, "The French Revolution", The Modern Library. Random House, Inc. New York. USA. 1968.



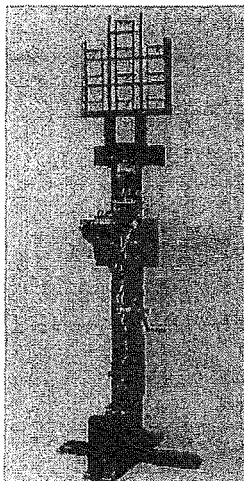
Pero parece que Chappe no llegó nunca a saborear su triunfo. Por una serie de hechos que no son de este lugar, en 1805, víctima de una depresión irreversible, se suicidó arrojándose a un pozo, frente a la administración telegráfica en el Hotel Villeroy.

#### 1.4.- TELÉGRAFO ÓPTICO DE A. EDELCRANTZ

Cientos de kilómetros al norte, en Suecia, el ejemplo francés también tuvo eco. En 1794, Abraham Edelcrantz (cuyo nombre real era Abraham Niclas Clewberg) construyó una línea de telegrafía óptica que unía el Palacio Real, en el centro de



(a)



(b)

**Figura 7.-** (a) Abraham Niclas Clewberg (posteriormente A. Edelcrantz) 1754-1821.  
(b) Modelo de uno de los transmisores del telégrafo óptico de Edelcrantz.

Estocolmo, con el palacio de verano en Drottningholm, situado a unos siete kilómetros de aquél. El 30 de enero de 1795, Edelcrantz inició la construcción de una nueva línea de mayor longitud, que entró en funcionamiento el 28 de julio y unía la iglesia de Katarina, en el centro de Estocolmo, con la fortaleza de Vaxholm, separadas unos 35 kilómetros. Dos nuevas líneas, de Estocolmo a Fredricsborg y de Grisslehamn a Signilsskär y Eckerö, en la isla de Åland.

El sistema que empleó, dada la escasa información que se había divulgado del invento de Chappe, fue prácticamente original. Un primer diseño era, en cierta forma, análogo al francés, o al menos a lo que viajeros por Francia contaban del sistema allí establecido. Mediante una matriz de nueve obturadores con uno más montado en la parte superior, un operador podía transmitir hasta 1024 señales diferentes, abriendo o cerrando cada obturador independientemente. En el caso de realizarse una transmisión alfabética, podían alcanzarse velocidades del orden de los 12 caracteres por minuto. A esta línea siguieron, poco después, otras que bordeaban la costa sueca (Fig. 8). En un principio se pretendía enlazar con otra incipiente que se empezaba a

construir en Dinamarca. Reveses militares impidieron que la propuesta se llevara a cabo.



**Figura 8.-** Red de telegrafía óptica desarrollada en Suecia. En el recuadro inferior aparece la primera línea experimental construida en 1795.

En noviembre de 1809 la red sueca tenía alrededor de 50 estaciones que cubrían una distancia aproximada de 200 kilómetros. La guerra de Suecia con Rusia, en la que pidió Finlandia, hizo que se dismantelara la red y en 1821, cuando muere Edelcrantz, gran parte de las torres que había construido están ya en ruinas. Tuvo que esperarse hasta 1838 para que, recuperada la paz, se alcanzara una extensión equivalente a la que había tenido antes. La última ampliación se realizó en 1854 y con ella concluyó la expansión del servicio.

Pero si Edelcrantz merece ser recordado por la realización del telégrafo óptico anterior, tanto o más lo merece por haber sido el primer ingeniero que escribió un verdadero tratado sobre los distintos métodos de transmitir señales a distancia, incluyendo su telégrafo óptico. Este tratado fue publicado en 1796 y muy pronto se tradujo al alemán y al francés.

Hacia 1840 casi todos los países europeos contaban con una o más líneas de telegrafía óptica en servicio. En Inglaterra, entre 1796 y 1816, el Almirantazgo construye líneas de Londres a Portsmouth, a Plymouth, a Yarmouth y a Deal. En Alemania, a partir de 1832 existe una línea que enlaza Berlín con Coblenza pasando por Postdam, Magdeburgo, Colonia y Bonn. Rusia entra en el juego un poco más tarde, en 1839, pero con un despliegue de medios impresionante. En esa fecha se inaugura una línea que cuenta con 220 estaciones y que une San Petersburgo y Varsovia.

## 1.5.- LA TELEGRAFÍA ÓPTICA EN ESPAÑA

Como en todos los países europeos, a raíz del telégrafo de Chappe se inició una larga serie de tentativas para la instalación de distintos tipos de telégrafos equivalentes que, con mayor o menor fortuna, llegaron a tener una cierta actividad. De todos ellos, únicamente se presentarán aquí los de A. de Betancourt, por ser el primero y, como veremos después, con unas características muy significativas, y el del J.M. Mathé, por ser el que tuvo una mayor difusión siendo su telégrafo, de hecho, el que primero se empleó, en larga distancia, para la transmisión de mensajes fuera del entorno oficial.

### 1.5.1.- TELÉGRAFO ÓPTICO DE AGUSTÍN DE BETANCOURT<sup>3</sup>

La vida de A. de Betancourt (Puerto de la Cruz, 1758- San Petersburgo, 1824) merecería, por sí sola, un número de páginas muy superior al que se podría dedicar a cualquier otro ingeniero español. Con todo honor debe ser considerado el primer ingeniero español y su obra fue reconocida en la mayor parte de los países europeos. Sus últimos años los pasó en Rusia donde realizó un importante número de trabajos de todo tipo, siendo su nombre tan conocido allí como en España. Sus restos fueron depositados en San Petersburgo, muy próximos a los de Euler, en un mausoleo de cerca de siete metros de altura.

Una de sus realizaciones menos conocida es la que se refiere a la construcción del primer telégrafo óptico español. Trabajando conjuntamente con el relojero francés A.L. Breguet, presentó en 1797, al Ministerio del Interior del Directorio de la República Francesa una "*Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique*". El ministro solicitó a la Academia de Ciencias que emitiera un informe sobre la misma, comparándole con el de Chappe. El comité que se formó para emitir dicho juicio estaba formado por nombres tan significativos como Coulomb, Lagrange, Laplace, Prony, Borda, Charles y Delambre. La prueba comparativa no pudo realizarse ya que Chappe se negó a ello. El informe emitido no pudo ser más elogioso. Entre otras cosas decía: "*Sin ningún estudio preparatorio, hicimos pasar despachos que nos fueron devueltos enseguida con la mayor fidelidad y hemos hecho preguntas que nos han contestado correctamente. No es inútil añadir que una de las frases que transmitimos estaba en latín y nos volvió con la misma exactitud que las demás, a pesar de que el colateral no tenía ningún conocimiento de esta lengua..... Este telégrafo reúne, en un grado que parece difícil de rebasar y aun de alcanzar, todas las cualidades que pueden asegurar facilidad, rapidez y precisión en la comunicación, economía en el establecimiento y reparación de las máquinas, etc.*". A pesar de todo lo anterior, y dada la gran influencia que tenía Chappe, el telégrafo de Betancourt no llegó a instalarse en Francia. Su éxito en España fue mayor, dado el prestigio que tenía su autor. A pesar de ello, y de que la Corona tenía intención de establecer una línea que comunicase Madrid con Cádiz, únicamente se construyeron cuatro torres telegráficas entre Madrid y Aranjuez, que funcionaron en 1800.

El telégrafo de Betancourt, aunque más complejo que el de Chappe en su construcción, tenía un uso mucho más sencillo. Poseía solo un travesaño orientado,

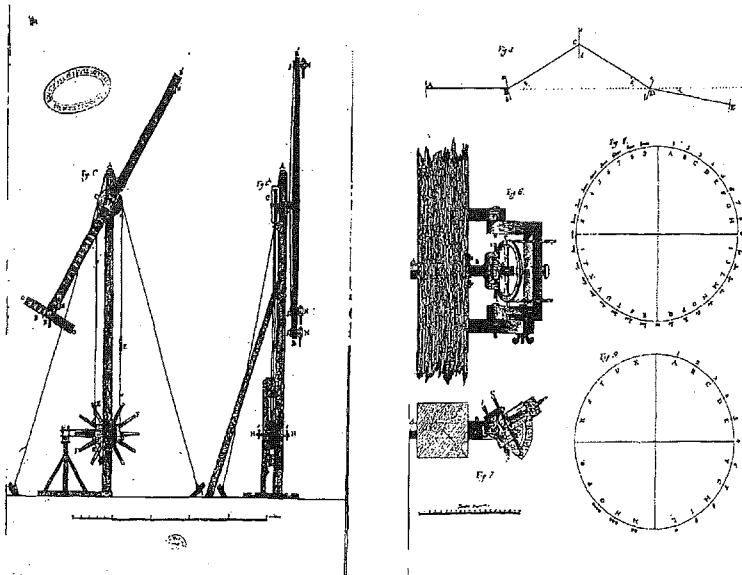


Figura 9.- A. de Betancourt

<sup>3</sup> "Betancourt. Los inicios de la Ingeniería Moderna en Europa", CEHOPU. 1996.

denominado "flecha", que podía adoptar 36 posiciones de un círculo (Fig. 10), separadas entre sí  $10^\circ$ . Con ellas podían transmitirse 26 letras de un alfabeto y 10 dígitos del 0 al 9. La dificultad principal residía en la correcta interpretación de posiciones tan próximas. La forma de resolverla era mediante el giro de la flecha y el de los dos oculares de los anteojos, que estaban sincronizados. Estos últimos llevaban, además, un hilo que se orientaba hasta ponerlo paralelo a la flecha. La capacidad del ojo de detectar el paralelismo de dos líneas conducía a la correcta interpretación de la posición. La forma de trabajo era así, la siguiente<sup>3</sup>:

- el telegrafista miraba la flecha de la torre anterior
- orientaba su flecha mirando por el anteojo hasta que su hilo estuviera paralelo a la flecha de la torre anterior. De forma automática, su flecha y el otro anteojo quedaban orientados.
- el telegrafista miraba por el otro anteojo a la torre siguiente para estar seguro de que se había recibido correctamente la señal.
- tras comprobar que no había error, se reiniciaba el proceso.



**Figura 10.**.- Láminas I y III correspondientes a la "*Mémoire sur un nouveau télégraphe et quelques idées sur la langue télégraphique*". A. de Betancourt y A.L. Breguet. París, 1797.

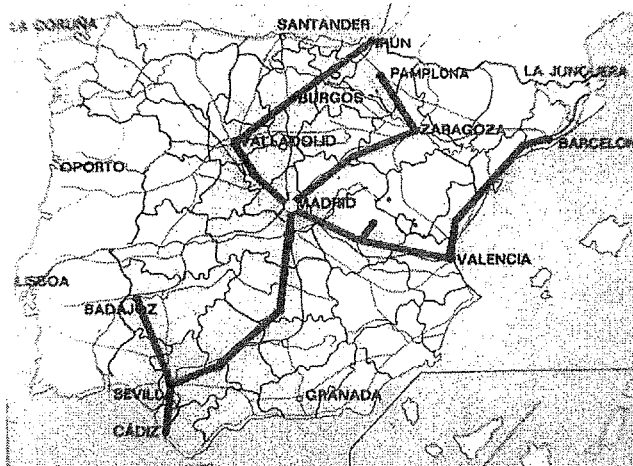
### 1.5.2.- TELÉGRAFO ÓPTICO DE JOSÉ MARÍA MATHÉ<sup>4</sup>

Tras varios intentos fallidos, entre 1808 y 1843, de construir líneas de telegrafía óptica con diferentes sistemas, en un Real Decreto de primero de marzo de 1844 se encarga a la Dirección General de Caminos establecer un telégrafo que una todas las capitales de provincia y fronteras con la capital del reino. Se encarga de la construcción de la primera línea al coronel José María Mathé y Aragua.

La primera línea, Madrid - Irún, se puso en servicio en octubre de 1846. Constaba de 52 torres y tenía su cabecera en el cuartel de Guardias de Corps (hoy del Conde Duque), en Madrid. A ésta siguieron otras dos líneas: Madrid a Barcelona, por Valencia, y Madrid-Cádiz, con 59 torres, inaugurada en 1853.



**Figura 11.-** Brigadier José M. Mathé.



**Figura 12.-** Red española de telegrafía óptica en el siglo XIX.

El sistema consistía, esencialmente, en una pieza móvil, llamada "indicador", que podía ascender y descender libremente por el centro de un bastidor que tenía tres franjas oscuras, paralelas, separadas claramente entre sí. El indicador, mediante una polea adecuadamente graduada, llamada "volante", podía tomar doce posiciones, diez de las cuales se hacían corresponder con los números de cero a nueve, y las otras dos se asignaban a funciones identificadas por las letras "X" (repeticón) y "m" (error). Una posición decimotercera, consistente en esconder el indicador a la vista (Lo que se denominaba "la arriada") se empleaba para separar dos signos, que se denominaban

<sup>4</sup> S. Olivé, "Historia de la Telegrafía Óptica en España". MTTyC. 1990.

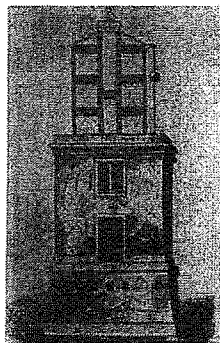
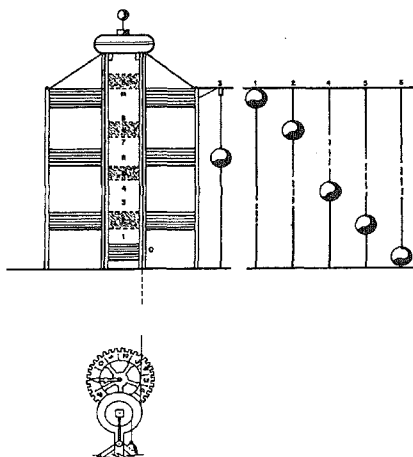
por ellos "signos absolutos", o dos frases. La arriada se anotaba en los diarios con una línea vertical; un signo absoluto se representaba por dos rayas.

Las doce posiciones se obtenían colocando el indicador tangente a las franjas por la parte inferior o superior, poniéndolo en línea con ellas o colocándolo en el espacio intermedio.

Una bola situada a un lado del armazón, variando sus posición con parecidos criterios que el indicador, proporcionaba señales de servicio complementarias.

Cada torrero repetía la señal recibida de la estación precedente y se aseguraba de su correcta recepción por la estación siguiente. Los mensajes telegráficos iban cifrados y la clave variaba periódicamente. Esta clave se regulaba mediante un "Diccionario" que constaba de 97 folios, cada uno de ellos con cuatro páginas (rotuladas "a", "b", "c" y "d"). Cada página tenía 50 filas y cada fila cinco columnas, lo que supone un total de 97.000 expresiones. Para identificar una expresión se necesitaban seis cifras: dos para el folio, una para la letra, dos para la fila y una para la columna. Entre las noticias que se encontraban cifradas, de acuerdo con diferentes categorías, estaban temas como viajes y salud de las personas reales, atentados, movimiento de buques de guerra y de tropas, cambios de altos funcionarios, noticias de la Bolsa y conmociones populares.

Estuvo en servicio hasta 1855 en el que el mismo Mathé, ya Brigadier, inició la construcción de un sistema de telegrafía eléctrica.



**Figura 13.-** Esquema del telégrafo óptico de J.M. Mathé (descripción en el texto) y vista de una de sus torres

CORIFE0

Y, ¿cuándo ha sido la ciudad arrasada?

CLITEMNESTRA

La noche que ha parido esta alborada.

CORIFE0

Y, ¿qué nuncio llegó tan prestamente?

CLITEMNESTRA

Hefesto, que desde el Ida<sup>15</sup>  
nos mandó brillante llama.  
Después, una hoguera manda  
otra llama mensajera  
hacia aquí: Ya desde el Ida  
a Lemnos, el monte de Hermes;  
más tarde, desde esta isla,  
al ingente resplandor  
acoge la cima de Atos,  
que está consagrada a Zeus;  
—ésta es la tercera etapa—.  
Más tarde, el empuje errante  
de la llama pega un brinco  
y la espalda del mar cruza...<sup>16</sup>  
Después anuncia la antorcha  
a los guardias del Macisto  
un resplandor tan dorado  
como el sol. Sin detenerse,  
y sin dejarse vencer  
por el sueño, incautamente,  
su papel de mensajero,  
aquél no olvida, y la luz  
de la hoguera parte lejos  
en dirección a las aguas  
del Euripo, y comunica  
su mensaje a los vigías,  
del Mesapio. A su vez, éstos  
su respuesta luminosa  
encienden, prendiendo fuego  
a un montón de broza seca  
y la mandan hacia aquí.  
Y llena de vigoría,  
sin jamás debilitarse,

la llama cruza, de un salto  
la llanura del Asopo,  
cual si la brillante luna  
fuera, y marcha hacia los riscos  
del Citerón, despertando  
otro relevo de fuego.  
Y la guardia allí apostada  
no se ha negado a avivar  
hoguera de largo alcance  
prendiéndola más potente  
de lo que se le ordenara;  
y salta su resplandor  
más allá de la laguna  
Gorgopis, y ya llegando  
al monte Egipianto, urge  
a no retrasar la orden  
de hacer fuego; entonces prenden,  
liberales, una llama,  
y enorme barba de fuego  
mandan, que a lo lejos brilla,  
con fuerza para saltar  
el promontorio que se alza  
sobre el Sarónico golfo.  
Da un brinco, y llega a la cima  
del Aracne —ese vigía  
que cabe nuestra ciudad  
se yergue, para llegar  
de un salto hasta los palacios  
del Atrida, esa ardorosa  
llama que, en cierta manera  
nieta de la hoguera es  
que allá en el Ida naciera.  
Estas eran las consignas  
que ya habían recibido  
los corredores de antorchas.  
Y la victoria merecen  
el último y el primero.  
He aquí la prueba, he aquí  
el signo que, desde Troya,

tion of Weights and Measures, with decimal division; Institutions, of Music and of much else; Institute in general; School of Arts, School of Mars, *Elèves de la Patrie*, Normal Schools: amid such Gun-boring, Altar-burning, Saltpetre-digging, and miraculous improvements in Tannery!

What, for example, is this that Engineer Chappe is doing, in the Park of Vincennes? In the Park of Vincennes; and onwards, they say, in the Park of Lepelletier Saint-Fargeau the assassinated Deputy; and still onwards to the Heights of Ecouen and further, he has scaffolding set up, has posts driven in; wooden arms with elbow joints are jerking and fugging in the air, in the most rapid mysterious manner! Citoyens ran up, suspicious. Yes, O Citoyens, we are signalling: it is a device this, worthy of the Republic; a thing for what we will call *Far-writing* without the aid of postbags; in Greek it shall be named Telegraph.—*Télégraphe sacré!* answers Citoyenism: For writing to Traitors, to Austria?—and tears it down. Chappe had to escape, and get a new Legislative Decree. Nevertheless he has accomplished it, the indefatigable Chappe: this his *Far-writer*, with its wooden arms and elbow-joints, can intelligibly signal; and lines of them are set up, to the North Frontiers and elsewhere. On an Autumn evening of the Year Two, Far-writer having just written that Condé Town has surrendered to us, we send from the Tuileries Convention-Hall this response in the shape of Decree: 'The name of Condé is changed to *Nord-Libre*, North-Free. The Army of the North ceases not to merit well of the country'.—To the admiration of men! For lo, in some half hour, while the Convention yet debates, there arrives this new answer: 'I inform thee, *je t'annonce*, Citizen President, that the Decree of Convention, ordering change of the name Condé into *North-Free*; and the other, declaring that the Army of the North ceases not to merit well of the country; are transmitted and acknowledged by Telegraph. I have instructed my Officer at Lille to forward them to North-Free by express. *Signed, CHAPPE*'.<sup>1</sup>

Or see, over Fleurus in the Netherlands, where General Jourdan, having now swept the soil of Liberty, and advanced thus far, is just about to fight, and sweep or be swept, hangs there not in the Heaven's Vault, some Prodigy, seen by Austrian eyes and spy-glasses: in the similitude of an enormous Windbag, with netting and enormous Saucer depending from it? A Jove's Balance, O ye Austrian spy-glasses? One saucer-scale of a Jove's Balance; *your* poor Austrian scale having

<sup>1</sup> *Choix des Rapports*, xv. 378, 384.



## 1.6 ANTECEDENTES DIRECTOS: PRIMEROS DISPOSITIVOS FOTÓNICOS<sup>1</sup>

Si los anteriores casos presentados eran ejemplos claros de sistemas de comunicaciones ópticas, los dispositivos empleados en ellos poco o casi nada tenían que ver con conceptos equivalentes a los que empleamos hoy en este campo. Eran comunicaciones ópticas, porque se empleaba información transmitida ópticamente, pero los instrumentos y los medios para llevarlas a cabo eran ampliamente empleados en otros campos: telescopios para conocer la información de la torre precedente, señales realizadas por procedimientos mecánicos y, sobre todo, toreros que las interpretaban. La introducción de dispositivos, al menos con la idea que hoy tenemos de ellos, necesitó esperar algunos años más. Y quizás su máximo representante fue Alexander Graham Bell.

La historia de Bell y las comunicaciones ópticas nació en su luna de miel en Inglaterra, entre 1877 y 1878. En esas fechas se acababan de publicar algunos trabajos de Robert Sabine, en "Nature", en los que indicaba que el selenio podía emplearse como una de las partes que configurasen una pila galvánica de forma "...that the slightest shadow or other variation in the intensity of the light caused a considerable variation in the electromotive force of the couple and a consequent indication.". Quizás basándose en esta idea, en mayo del 78 dio una conferencia en la Royal Institution de Gran Bretaña apuntando la idea básica de su futuro invento: "If you insert selenium in the telephone battery and throw light upon it, you change its resistance and vary the strength of the current you have sent to the telephone, so you can hear a shadow".

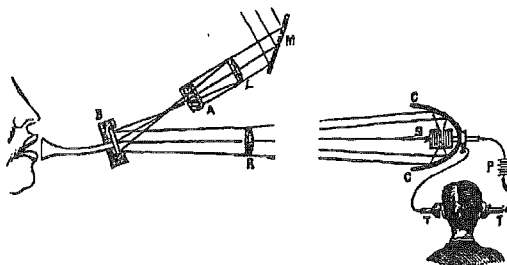


Figura 14.- Esquema del Fotófono de Bell.

A su vuelta a Estados Unidos, y tras una serie de problemas derivados de la lucha por los derechos de su anterior invento, el teléfono, Bell intentó poner en práctica su idea. Con la ayuda de Sumner Tainter, un experimentado fabricante de equipos, inició a finales de 1879 el desarrollo de lo que ya llamaba "Fotófono". El 19 de febrero del año siguiente sus experiencias dieron fruto. Bell y su ayudante pudieron percibir claramente una nota en el auricular de un teléfono conectado en serie con una célula de selenio y con una batería, cuando un haz de sol incidía sobre aquella, tras pasar a

<sup>1</sup> J.A. Martín Pereda, "Sistemas de Comunicaciones Ópticas". En "Tecnologías Fotónicas y Comunicaciones Ópticas". Ed.: M.A. Rebolledo y A. Blesa. IET. 1998.

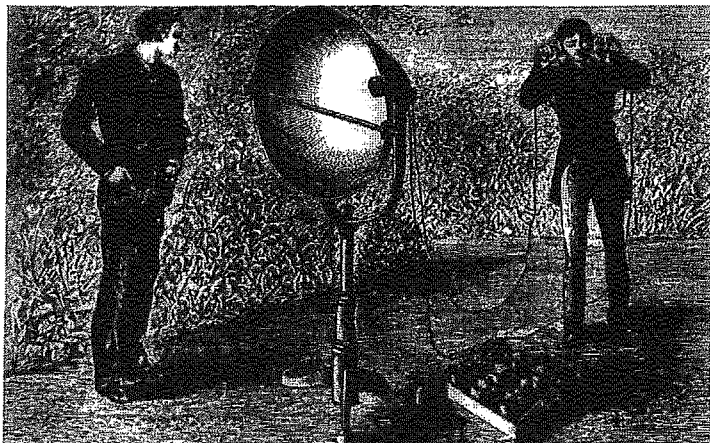
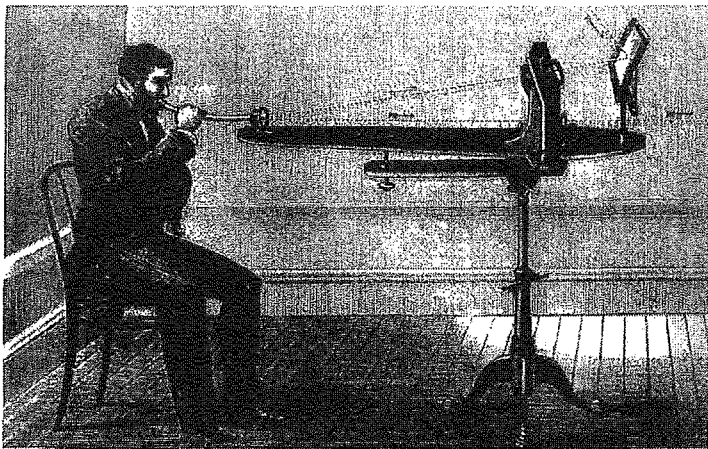


Figura 15.- Ilustración en "*Der Natuur*", p. 1 (1881) del emisor y del transmisor del Fotófono Bell y Tainter.

través de un disco perforado que giraba a una cierta velocidad. El paso para la transmisión de palabra parecía inmediato. Y así fue.

El sistema final se basaba en la reflexión de un haz luminoso, normalmente un rayo de sol, sobre un diafragma situado al final de una especie de trompetilla a través de la que Bell hablaba<sup>2</sup>. La señal acústica hacía vibrar al diafragma y con ello se

<sup>2</sup> A.G. Bell, "Selenium and the photophone". *The Electrician*, pp. 214, 215, 220, 221 (1880).

conseguía una pequeña modulación de intensidad en la luz que se reflejaba. Ésta, a su vez, se recogía a una cierta distancia mediante un espejo que la enfocaba sobre un elemento sensible a la luz, la célula de selenio mencionada antes, generándose en ella una corriente eléctrica que actuaba, finalmente, sobre un altavoz. Las primeras palabras que parece se transmitieron fueron "*Hoy, hoy*"<sup>3</sup>, dichas por Tainter y, después la canción "Auld Lang Syne". Bell se sintió tan orgulloso de su invento que estuvo a punto de poner a su segunda hija, que había nacido cuatro días antes, el nombre de "Photophone". Afortunadamente para ella, alguien convenció a Bell de que no lo hiciera. En una carta escrita a su padre el 26 de febrero le decía "*I have heard articulate speech produced by sunlight; I have heard a ray of the sun laugh and cough and sing ... I have been able to hear a shadow, and I have even perceived by ear the passage of a cloud across the sun's disk ...*" La ilusión que puso Bell en su fotófono fue muy superior a la que había puesto en el teléfono.

La primera transmisión pública tuvo lugar el 1 de abril de 1880, en la Massachusetts Avenue, en Washington, D.C., con una distancia de 79,62 metros entre emisor y transmisor. Experiencias posteriores parece llegaron a alcanzar los 200 metros.

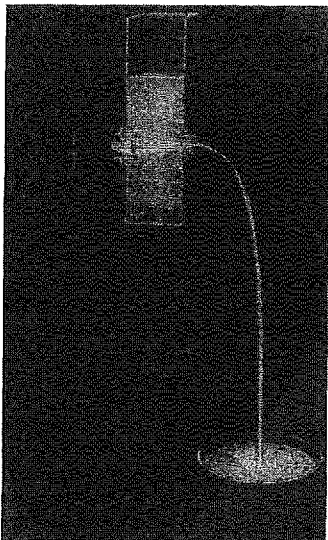
Es importante señalar, y de ahí el título dado a esta sección, que gran parte del trabajo de Bell se centró en el desarrollo de distintos tipos de elementos sensibles a la luz y de otros capaces de generar una mejor modulación de la luz transmitida. Esto muestra la importancia que le dio a los dispositivos que intervenían en el sistema. Entre los materiales que probó para el fotodetector se encuentran, además de los convencionales, otros puramente no eléctricos como discos de goma endurecida, zinc y antimonio. Estos trabajos dieron lugar a lo que más adelante se conocería como espectroscopia optoacústica. Por lo que respecta a la forma de modular la luz, una de las más indicativas de su anticipación al futuro es la que se refiere al uso de luz polarizada, método empleado hoy para realizar idéntica función en algunos tipos de láseres. Redes de difracción y espejos vibrantes fueron otras de las técnicas empleadas.

En 1896, Bell inició los trabajos necesarios para estudiar una fuente luminosa sin los inconvenientes que tenía la dependencia con el sol. Su fe en el fotófono seguía siendo ciega. Pero ese mismo año, las experiencias de Marconi con la radio eclipsaron todo lo que Bell estaba haciendo. Y así el fotófono quedó relegado al olvido. A pesar de ello, en 1921, un poco antes de su muerte, consideraba al fotófono "*In the importance of the principles involved ... as the greatest invention I have ever made; greater than the telephone*".

Pero como quedaba claro de las experiencias de Bell, el uso del sol como fuente luminosa y del espacio libre como medio de transmisión no eran la mejor solución para el envío de señales. Era necesario que otros conceptos entraran en escena. Y el más evidente parecía el de que la luz fuera guiada a través de un medio que no la atenuara y pudiera encaminarse por caminos más o menos complejos. Las realizaciones de la época victoriana son también claros antecedentes de lo que hoy se ha conseguido.

---

<sup>3</sup> No es la traducción de "*today*", sino una simple exclamación en inglés.



**Figura 16.-** Grabado de D Colladon, de 1841, mostrando el guiado de luz en un chorro de agua mediante una lámpara de arco.

Y el más señalado lo constituyen las experiencias realizadas por el irlandés John Tyndall. Una de las cualidades que más distinguían a este investigador era la de que, además de ser un reputado físico, era también un consumado charlista, con el extendido afán anglosajón de popularizar la Física. Debido a este hecho, durante gran parte de su vida se dedicó a dar, de tiempo en tiempo, giras por Gran Bretaña en las que enseñaba lo que la Física podía hacer. Y entre las experiencias que tenía estaba la de mostrar las propiedades de la luz. Con recipientes de vidrio, llenos de agua ligeramente turbia por gotas de leche añadida en suspensión, mostraba la reflexión y la refracción. Al final de la sesión, los asistentes podían ver cómo un haz de luz se propagaba en zigzag a lo largo de un chorro que caía del recipiente hasta que, debido a la turbulencia de éste, la radiación óptica se dispersaba. Dicho de otra forma, mostraba las propiedades de la reflexión total para transmitir luz a través de una guía líquida.

Tyndall jamás pensó que este hecho constituyese algo digno de ser comunicado a sus doctos colegas de la

Royal Society. Y no lo hizo. Según parece, Bell sí le vio en una de sus giras por Boston, entre 1872 y 1873. Pero como la idea que primaba en Bell era la de la transmisión por el espacio libre, en la que encontraba un mayor grado de libertad, no aprovechó para nada las experiencias de Tyndall.

Sí lo hizo, en cambio, William Wheeler, un ingeniero cuya mayor preocupación era la iluminación de edificios. Si Bell puede considerarse un precursor en el diseño de dispositivos para comunicaciones ópticas, Wheeler puede serlo del guiado de luz a través de un vidrio. Su patente se basaba en la existencia de un gran foco de luz, situado en alguna parte de la casa, del que partían una serie de tubos de vidrio recubiertos de un metal con alta reflectividad. Apuntó el hecho de que la intensidad de luz generada por una fuente eléctrica variaba "*in a way greatly exceeding the square of the amount of the current times the resistance*". En función de ello llegó a la conclusión de que era más favorable el uso de un foco de alta intensidad que el de varios más pequeños, situados en lugares alejados unos de otros y que "*perfection in artificial lighting ... consists of light of low intensity, radiating from many points in all directions*". Wheeler no tuvo en cuenta, en sus diseños, la acumulación de absorciones en las sucesivas reflexiones que se iban produciendo, con lo que la intensidad de la luz quedaba casi anulada a los pocos metros. La forma de guiar luz estaba probada, pero faltaba mucho para que pudiera ser aprovechada de forma eficiente. Era necesario realizar un esfuerzo significativo en el terreno de la fabricación de fibras de vidrio.

Entre los primeros avances que merecen señalarse se encuentran los de Charles Vernon Boys, un ingeniero metalúrgico cuyo interés principal pronto derivó hacia el diseño de instrumentos científicos, llegando a formar parte del cuadro de profesores del departamento de Física de lo que luego, en 1881, sería el Royal College of Science, en South Kensington. Para sus desarrollos de equipos precisaba

W. WHEELER.

APPARATUS FOR LIGHTING DWELLINGS OR OTHER STRUCTURES.

No. 247,329.

Patented Sept. 20, 1881.

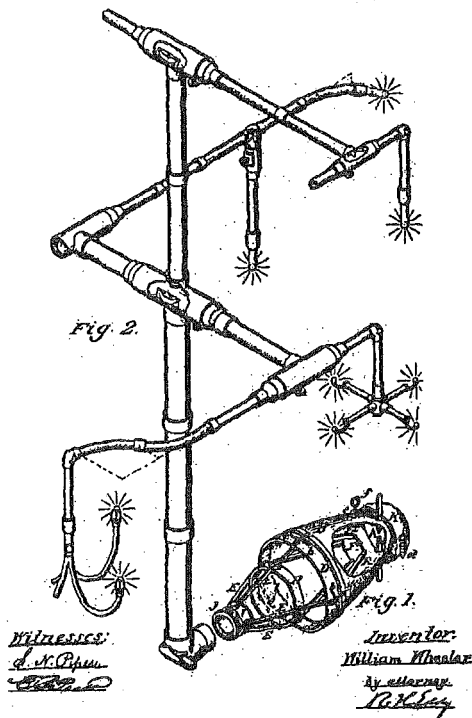


Figura 17.- Patente de William Wheeler para la iluminación de recintos, mediante tuberías de vidrio recubierto con una película metálica. No empleaba reflexión total sino solo reflexión sobre una superficie metalizada

en más de un sexto de su valor, lo cual es significativo, dada la técnica empleada. Mecánicamente eran muy superiores a las obtenidas hasta entonces mientras que las propiedades ópticas apenas fueron estudiadas. Este hecho no es difícil de entender dado el pequeño diámetro de las mismas. Hasta muy recientemente no se ha llegado a saber cómo introducir luz eficientemente en las actuales fibras ópticas y éstas tienen diámetros varias veces mayores que las de Boys. El único uso óptico que las dio fue el de la realización de redes de difracción de  $1/8$  de pulgada, situando una serie de estas fibras, una al lado de la otra. Con ellas llegó a observar hasta el tercer orden de algunos espectros de difracción. La fibra estaba hecha, pero sus propiedades ópticas aun estaban por perfeccionar y por medir.

de hilos muy finos con unas determinadas propiedades mecánicas. Los más empleados hasta entonces eran la seda sin tejer y el hilo de araña. Pronto Boys derivó hacia algunos minerales encontrando que las mejores propiedades se daban en el cuarzo. Y con él inició sus experiencias de obtención de fibras de vidrio. El método que empleó era increíblemente simple. Calentaba una varilla de vidrio hasta que estaba parcialmente fundida y, atando un extremo a la punta de una flecha mientras dejaba fijo el otro, la lanzaba con un arco de manera que se estirase hasta que la solidificación del vidrio lo permitiera. Dado que las flechas debían ser lo más ligeras posible, empleó pajas de cereales, lanzándolas en un habitación de 90 pies. Con este método llegó a conseguir fibras de vidrio de 0,0001 pulgadas, esto es, unas 2,5 micras. Las variaciones de diámetro no variaban

### APÉNDICE 3

#### NOTICIA APARECIDA EN "DER NATUUR", 1881, pág. 1, INFORMANDO DEL INVENTO DEL FOTÓFONO

One of the most interesting inventions of recent months is the photophone or 'light speaker.' On 26th April 1880 Alexander Graham Bell, the famous inventor of the now familiar telephone, announced that while working in conjunction with Summer Tainter he had made some discoveries which had finally led him to manufacture an instrument with which sound can be transmitted and propagated by means of light.

The photophone consists of a transmitter and a receiver. In the case of the receiver, the rays of a powerful light source, such as sunlight or electric light, are reflected by a flat mirror into a system of lenses which forms the light into a beam and throws it on to a silver-coated glass plate. When someone speaks into the mouthpiece of a rubber tube the silver-coated plate picks up vibrations which cause the reflecting surface of the plate to change shape. This in turn affects the strength of the light-rays which are concentrated into a parallel beam by a second system of lenses and then reflected towards the receiver.

This latter instrument, situated some distance away, consists of a hollow, parabolically ground mirror of silver-coated copper. A cylinder of copper plates separated by strips of mica and filled with the metal

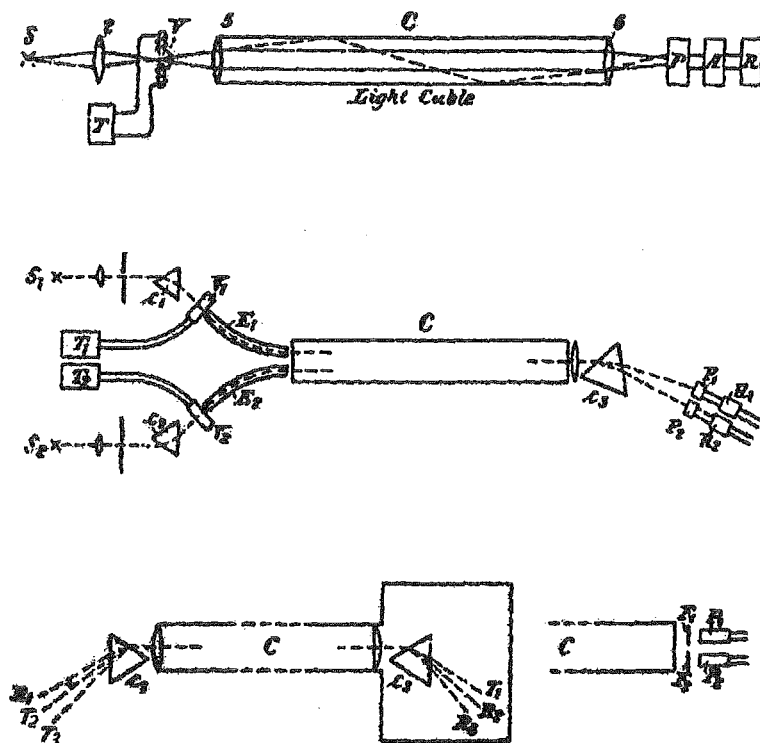
selenium is placed in the centre of this mirror. The resistance of this device changes in accordance with the quantity of light which strikes it. The selenium between the edges of the copper plates is incorporated in a circuit consisting of a nine-cell battery and a double telephone which reproduces everything the speaker pleases to say into the rubber tube.

Bell and Tainter have devised and tested some fifty different designs for the photophone. The greatest distance over which they succeeded in transmitting the spoken word was 218 metres. Tainter stood on the tower of the Franklin School in Washington with his transmitter and Bell remained at the window of his laboratory with his receiver. When Bell put the telephone to his ear he heard Tainter say quite clearly: "Mr Bell, if you can hear what I am saying come to the window and wave your hat."

The photophone can also transmit songs with great purity of tone. By introducing a perforated disc into the beam in the transmitter, musical notes are obtained in the telephone of the receiver. If there are thirty holes in the disc, and it rotates ten times per second, a pitch of 800 vibrations per second is set up. The possibilities which this holds for the world of music are undoubtedly remarkable.

## 1.8.- SISTEMA DE TELEFONÍA ÓPTICA DE NORMAN R. FRENCH

Aunque ya sin entrar en detalles, y como colofón a algunos de los desarrollos realizados con anterioridad al verdadero nacimiento de las Comunicaciones Ópticas, si merece mencionar la patente presentada en 1934 por el ingeniero americano Norman R. French y que, sin haberse llevado a la práctica, constituye un verdadero sistema de comunicaciones del tipo conocido hoy como WDM, esto es de multiplexación por longitudes de onda.



**Figura 18.-** (a) La luz de la fuente  $S$  se modula al pasar por una "válvula de luz", e enfocada por una lente, y pasa a través de un conducto,  $C$ , que puede ser o una varilla de cuarzo o un tubo en el que se ha hecho el vacío. En el receptor, incide sobre una célula fotoeléctrica,  $P$ , y la corriente eléctrica resultante es amplificada para su reconocimiento.

(b) y (c) Posible empleo de prismas para transmitir y recibir varios mensajes telefónico por un mismo camino óptico.

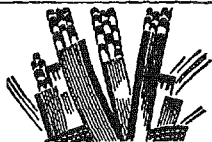
ning me it had that I ran weeping silently as a child might do. Once I had turned, I did not dare to look back.

I remember I felt an extraordinary persuasion that I was being played with, that presently, when I was upon the very verge of safety, this mysterious death — as swift as the passage of light — would leap after me from the pit about the cylinder and strike me down.

---

## CHAPTER 6

---



### THE HEAT-RAY IN THE CHOBHAM ROAD

It is still a matter of wonder how the Martians are able to slay men so swiftly and so silently. Many think that in some way they are able to generate an intense heat in a chamber of practically absolute non-conductivity. This intense heat they project in a parallel beam against any object they choose by means of a polished parabolic mirror of unknown composition, much as the parabolic mirror of a light-house projects a beam of light. But no one has absolutely proved these details. However it is done, it is certain that a beam of heat is the

essence of the matter. Heat, and invisible, instead of visible light. Whatever is combustible flashes into flame at its touch, lead runs like water, it softens iron, cracks and melts glass, and when it falls upon water, incontinently that explodes into steam.

That night nearly forty people lay under the starlight about the pit, charred and distorted beyond recognition, and all night long the common from Horsell to Maybury was deserted and brightly ablaze.

The news of the massacre probably reached Chobham, Woking, and Ottershaw about the same time. In Woking the shops had closed when the tragedy happened, and a number of people, shop-people and so forth, attracted by the stories they had heard, were walking over the Horsell Bridge and along the road between the hedges that runs out at last upon the common. You may imagine the young people brushed up after the labours of the day, and making this novelty, as they would make any novelty, the excuse for walking together and enjoying a trivial flirtation. You may figure to yourself the hum of voices along the road in the gloaming. . . .

As yet, of course, few people in Woking even knew that the cylinder had opened, though poor Henderson had sent a messenger on a bicycle to the post-office with a special wire to an evening paper.

As these folks came out by twos and threes upon the open, they found little knots of people talk-





Planck y Einstein

## PLANCK, EINSTEIN Y EL CUERPO NEGRO (I)

- Hechos empíricos conocidos, a finales de siglo XIX, del comportamiento del cuerpo negro:

Ley del desplazamiento  $\lambda_m T = \text{const.}$

Ley de Stefan-  $E_o = \sigma T^4$ ,

- Teorías asentadas a principios del siglo XX:

- Teoría de Maxwell del Electromagnetismo de Maxwell
- Teoría de la Termodinámica de Boltzmann.

A partir de ellas se llega a la

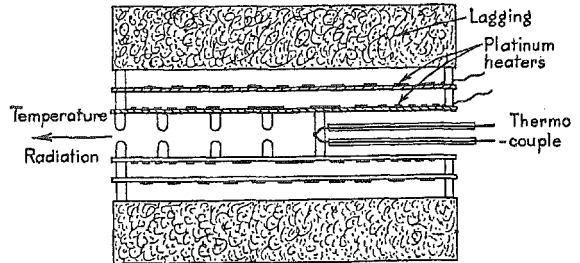
**Fórmula de Rayleigh-Jeans:**

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^2} kT.$$

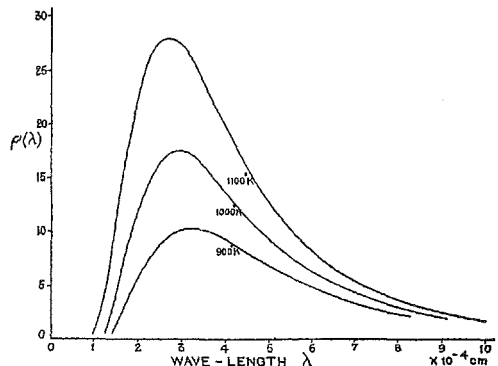
Errónea. Conduce a la *"catástrofe en el ultravioleta"*

En 1900, Max Planck (1858-1947), introduciendo el concepto de "cuantos" de energía, fue capaz de justificar, teóricamente, la curva experimental, que da la radiación del cuerpo negro.

$$\rho(\nu) = \frac{\lambda}{\nu} \rho(\lambda) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$



Equipo utilizado por Coblenz, en la década de los 20, para medir la radiación del cuerpo negro.









Variación de la densidad de energía por unidad de longitud de onda, en función de la longitud de onda, emitida por un cuerpo negro.

## PLANCK, EINSTEIN Y EL CUERPO NEGRO (II)

**1917:** Publicación por **A. Einstein (1879-1955)**, del artículo:  
**"Zur Quantentheorie der Strahlung"**, *Physikalische  
 Zeitschrift*, **18**, 121-128, 1917.

Introdujo en él el concepto de "emisión estimulada" y los coeficientes  
**A** y **B** que llevan su nombre.

Proceso	Situación inicial	Situación final	Coeficiente
Absorción $\curvearrowright$			$B_{12}$
Emisión espontánea			$A_{21}$
Emisión estimulada $\curvearrowright$			$B_{21}$

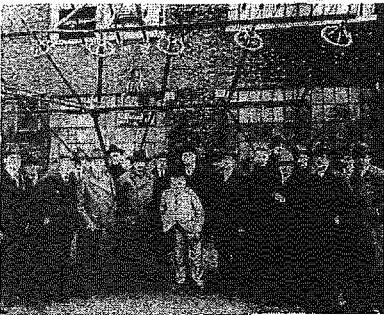


Fig. 1. A group of men, including Albert Einstein, standing in front of the Reichstag building in Berlin, Germany, in 1933. Einstein is the man in the center, wearing a dark suit and a white shirt. The group is standing in front of the Reichstag building, which is a large, ornate building with many windows and a clock tower. The photo was taken in 1933, the year Einstein was appointed to the Prussian Academy of Sciences in Berlin.

Einstein de forma teórica, planteó, con estos procesos los fenómenos que tenían lugar en el interior del cuerpo negro y justificaban la expresión de la radiación que emitía. Se vio así la posibilidad de "amplificar" una radiación incidente mediante el concepto de la emisión estimulada. Demostró también, que los tres coeficientes,  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  y  $B_{12}$ , estaban relacionados entre sí.

El camino para el láser estaba abierto. Pero faltaban todavía bastantes años para que la tecnología accediese al nivel necesario para que se pudiera llevar a cabo.

## **EL RADAR (I)**

Acrónimo de “**RADIO Detection And Ranging”, introducido por la U.S. Navy a finales de 1940.**

### **ANTECEDENTES**

Hertz demostró, en 1886, que los metales eran capaces d reflejar ondas electromagnéticas

Tesla, en 1899, sugirió que se podría aprovechar l anterior para reconocer la presencia de objetos próximos. En 1904, el ingeniero alemán C. Hülsmeyer patentó u sistema, basado en las ideas de Hertz, para evitar la colisiones entre barcos. No fue aceptado por la Marin alemana por su ineficiencia para distancias superiores a milla.

### **INICIOS**

Marconi, en 1922, publicó un artículo sobre la posibilidad de detección de objetos mediante ondas de radio. El laboratorio de Investigación de la Armada american probó experimentalmente el concepto. Era un “radar” d onda continua, con las antenas emisora y receptor separadas, que pudo detectar el paso de un barco d madera entre ellas.

El concepto de detección mediante pulsos de radio nació en USA, en 1925. Se aplicó a la medida de la ionosfera.

En 1930 se iniciaron , principalmente en USA, UK, Francia, Alemania, Japón y la URSS, los trabajos conducentes a l construcción de un sistema que detectara objetos e movimiento.

## **EL RADAR (II)**

En 1934, R.M. Page y su equipo, en Estados Unidos obtuvieron los primeros resultados positivos. En abril de 1936 se consiguió mejorarlos significativamente. El objetivo principal era eliminar la necesidad de una gran separación entre emisor y receptor. Se consiguió aumentando la frecuencia, de 28,6 a 200 MHz, y empleando un duplexor para emplear la misma antena para emitir y para recibir.

El primer radar francés se fabricó para la detección de icebergs. A tal fin se instaló a bordo del trasatlántico "Normandie", en 1938.

### **SEGUNDA GUERRA MUNDIAL**

En 1939 se desarrolló, en Alemania, un sistema denominado "Freya" para la localización de aviones. En el 40 se transformó en el "Würzburg", un sistema de 400 MHz, con idénticos fines.

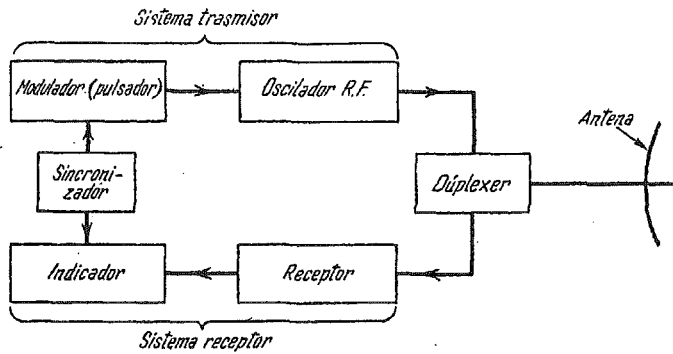
Desde 1939, Inglaterra empezó también a utilizar sistema equivalentes con el fin exclusivo de la detección de aviones. Los estudios en este terreno los iniciaron a mediados de los treinta, siendo el responsable Robert A. Watson-Watt. Con seis ayudantes, comenzó a trabajar en Orfordness, en la costa de Suffolk. Pronto fueron capaces de detectar aviones a 50 millas de distancia. Su mayor fama la alcanzó en 1940, en la Battle of Britain, vencida principalmente gracias al empleo de los sistemas radar que había desarrollado. Su principal logro fue el invento el empleo del magnetrón.

## **EL RADAR (III)**

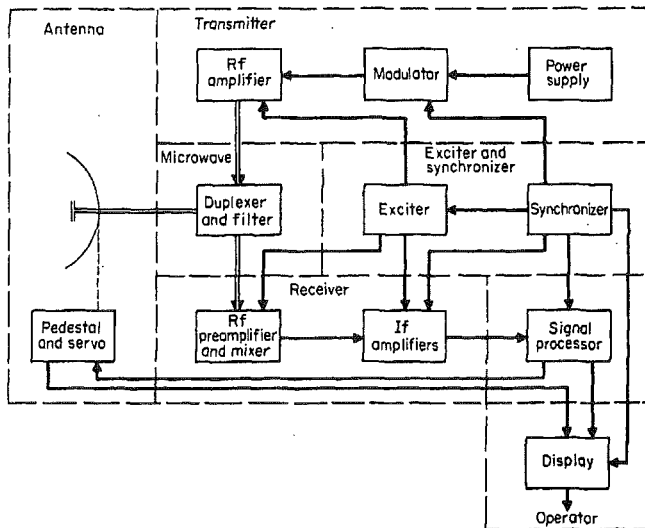
En 1939, el Almirantazgo Británico pidió a la Universidad d Birmingham que desarrollara un transmisor de microonda de alta potencia y con un haz muy estrecho y direccional. Esto implicaba el incremento de frecuencias por encima d los pocos megaherzios que se estaban empleando desde e principio de la guerra. El inicio de los trabajos se centró e el desarrollo del klystron. J.T. Randall y H.A.H. Boot tomaron el concepto del resonador empleado en e klystron y, basándose en él, desarrollaron el prime magnetrón. El resultado revolucionó el radar ofreciendo muy altas potencias, del orden de lo kilovatios, en unas longitudes de onda del orden d los centímetros.

En 1940, por un acuerdo entre Gran Bretaña y USA se transfirieron los conocimientos adquiridos a segundo país y los laboratorios de la Bell pusiero sus instalaciones materiales y humanas par conseguir el objetivo de alcanzar los Gigaherzios. Los pulsos radar por encima de los 10 kilovatios. Lo obtenido fue clasificado como alto secreto militar gracias a ello, los aliados mantuvieron su primacía en este campo durante toda la guerra.

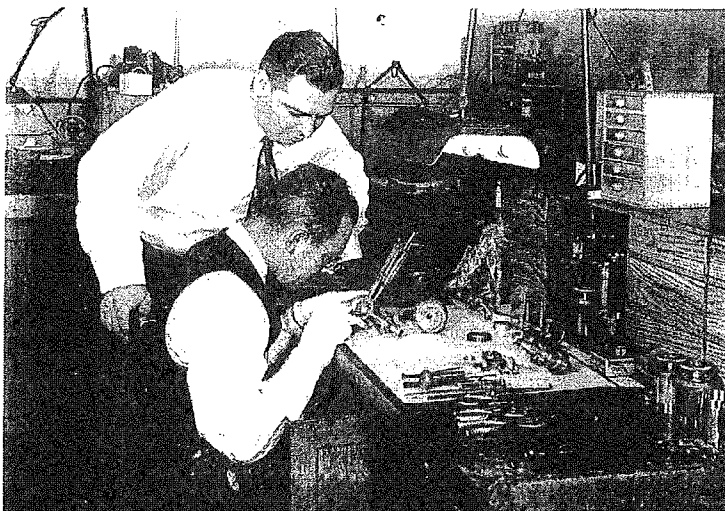
En 1943, Alemania derribó un bombardero inglés qu llevaba un radar de 10 cm y, poco después, otr americano con uno de 3 cm. Alemania, con lo equipos tomados, desarrolló muy rápidamente u nuevo sistema de radar que comenzó a usarse desde entonces.



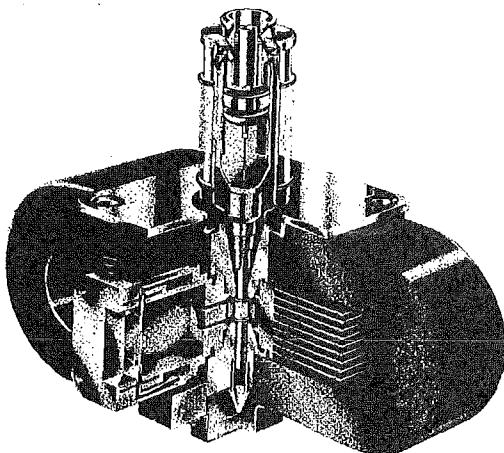
**Esquema básico de un radar**



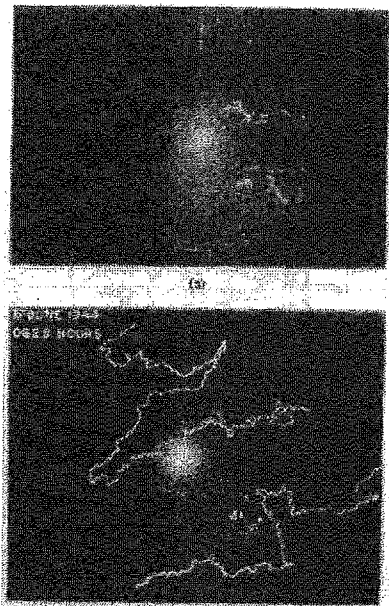
**Principales circuitos que componen un sistema radar**



Ingenieros trabajando con la cavidad de un magnetrón, en el MIT Radiation Laboratory. El "Rad Lab", como era designado, fue el centro de investigación en Radar durante la Segunda Guerra Mundial, principalmente con patentes

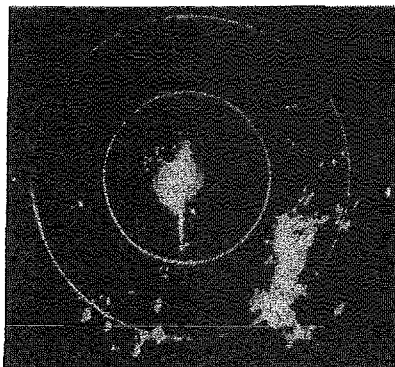


Esquema de magnetrón 4J50 parcialmente seccionado. El cilindro de cobre, con la cavidades, está equipado con aleta de refrigeración. Está sellado arriba y abajo con tapas de hierro que constituyen, a mismo tiempo, los polos del imán permanente, cuyo campo se dirige a lo largo del eje de cilindro.



Fotografías de radar de la península de Cherbourg, tomadas durante l Segunda Guerra Mundial. Los punto que aparecen en la primera s corresponden con la posición d Cherbourg. El mapa dibujado en l segunda no aparece en la imagen de

Ecos producidos por nubes densas en un radar de 10





## EL MÁSER: ANTECEDENTES (III)

### SITUACIÓN TECNOLÓGICA A FINALES DE LOS CUARENTA

La invención del RADAR, durante la Segunda Guerra Mundial, había impulsado considerablemente todas las tecnologías relacionadas con la generación y el uso de las microondas. Uno de los temas que se derivaron de ello fue el del estudio de la interacción radiación-materia, especialmente con gases, para esas longitudes de onda. El resultado fue la *espectroscopía de microondas*, que se desarrolló primero en laboratorios de la industria, donde había diferentes tipos de radares, y posteriormente en las universidades. Uno de los objetivos era la obtención de ondas de radio con frecuencias superiores a las centimétricas, que eran las empleadas en microondas. Parecía que con el empleo de moléculas podía ser más factible que con el de electrones libres.

Los años 40 vivieron una intensa actividad en el estudio de átomos, moléculas y núcleos. Con potencias de radio no muy altas era posible saturar la absorción y alterar así drásticamente el número de átomos que podían encontrarse en los diferentes estados cuánticos. En el límite, las poblaciones de los estados superiores e inferiores eran casi iguales. Esto implicaba que no se podía alcanzar, por ese método, la inversión necesaria para obtener amplificación. Había que incrementar la emisión estimulada de otra manera.



Charles Townes

## EL MÁSER: TOWNES (I)

**Charles H. Towne**  
(1915, South Carolina - )

Tras obtener el doctorado en el CalTech, en Pasadena durante la Segunda Guerra Mundial participó, trabajando para I Bell, en el proyecto para un radar a la frecuencia no alcanzada de 24.000 MHz, destinado a un sistema de bombardeo. Townes advirtió que a esa frecuencia el vapor de agua absorbía fuertemente la radiación. El radar, efectivamente, no funcionó pero gracias a él Townes se interesó por la espectroscopía de microondas.

En 1947 se incorporó a la Columbia University y continuó trabajando, mediante contratos con las fuerzas armadas, en la búsqueda de osciladores de frecuencias más altas. Tras varios años de trabajo, en la mañana del 11 de mayo de 1951 atendiendo a una conferencia en Washington, D.C., encontró la forma de alcanzarlas. Dado que realizar resonadores con las reducidas dimensiones requeridas era imposible, vio que la única forma era separar mediante un campo magnético las moléculas que se encontrasen en estados diferentes. Con ello se podría alcanzar la inversión de poblaciones y el oscilador requerido.

De vuelta en la Universidad, conjuntamente con James P Gordon y H.J. Zeiger, inició los trabajos para poner en marcha su idea.

## EL MÁSER: ANTECEDENTES (I)

- Entre 1928 y 1933, Rudolf Walther Ladenburg (1882 1952) ("Investigations on the anomalous dispersion of excited gases; Part I, Test of the quantum-theoretical dispersion formula", *Z. Physik*, **48**, 15, 1928) confirm experimentalmente la realidad de la emisión estimulada predicha por Einstein unos años antes. El artículo de 1933 (*Rev Mod. Phys.* 5, 143), acaba con estas palabras:

*"...This "negative dispersion" corresponds to the negative absorption of the theory of radiation and to the term -1 in the denominator of Plack's formula for the radiation of a black body as is easily shown by Einstein's derivation of this formula."*

- En 1940, V.A. Fabrikant, en el Instituto de Potencia d Moscú, anotó en su Tesis Doctoral:

*"Para que pueda alcanzarse amplificación es necesario que  $N_2/N_1$  sea mayor que  $g_2/g_1$ . Esta situación no se ha podido alcanzar en ningún tipo de descarga aunque en principio parece que pueda ser factible ... En tales circunstancias podría obtenerse una radiación de salida mayor que la de entrada, co lo que se alcanzaría una absorción negativa".*

El 18 de junio de 1951 presentó una patente, publicada e 1959, con el título: *"Un método para la amplificación d radiación electromagnética (bandas ultravioleta, visible, infrarroja y de radio) ..."*. La Oficina Soviética de Patentes no la aprobó en una primera instancia. Parece que Fabrikant no llegó a construir ningún dispositivo basado en esa idea. Es de recalcar el hecho de que propuso el láser antes que el máser.

## EL MÁSER: ANTECEDENTES (II)

W.E. Lamb, Jr y R.C. Retherford ("Fine structure of the hydrogen atoms, Part I", *Phys. Rev.*, **79**, 549 (1950)) recalcaron la posibilidad d que las moléculas excitadas podrían amplificar el proceso de emisión estimulada.

E.M. Purcell y R.V. Pound ("A nuclear spin system at negative temperature", *Phys. Rev.*, **81**, 279, (1951)) introdujeron el concepto de "temperatura negativa" y desarrollaron la idea de la "amplificación negativa".

### **MASER DE WEBER**

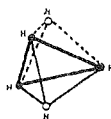
Aunque no con ese nombre, Joseph Weber presentó en la "Electron Tube Research Conference" de 1952, en Otawa, la primera descripción pública del principio del máser, aunque sin un dispositivo que trabajase con esos conceptos.

Dejó establecido el hecho de que la amplificación que se obtendría era coherente, que eso se conseguiría gracias a la emisión estimulada que es la que puede excitar a los átomos o a las moléculas que se usen y que es necesaria la inversión de poblaciones.

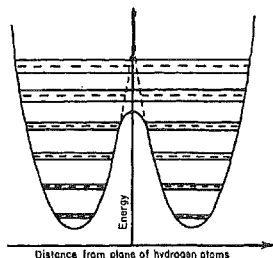
Tras la Conferencia le invitaron a dar un Seminario en RCA sobre este tema. Poco después, Townes le escribió para pedirle una separata de su trabajo. En el artículo en el que anunciaba el máser, Townes no le mencionó. Si lo hizo en artículos posteriores.

## EL MÁSER: TOWNES (II)

El material adoptado para realizar las experiencias fue la molécula de amonio, y la idea era alcanzar la frecuencia de 24.000 Mz.



The pyramidal structure of the ammonia molecule.

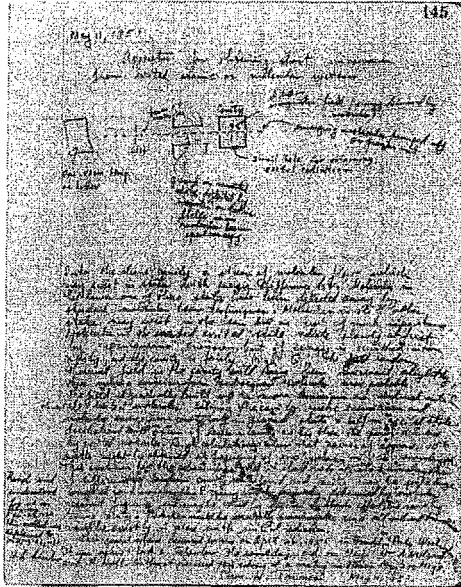


Double minima of the potential curve for ammonia which give rise to the inversion splitting of the vibrational levels.

En 1953 el dispositivo funcionó por primera vez. Para celebrarlo, Townes con Gordon y T.C. Wang, su nuevo estudiante, fueron a cenar mientras trataban de bautizar a su invento con un nombre en latín (Townes, mientras se graduaba en Física, había estudiado griego, latín, anglo-sajón, francés y alemán, idiomas que complementó con el ruso y el italiano mientras hacía el master). No lo encontraron. Unos días después lo bautizaron como **MASER** ("Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation").

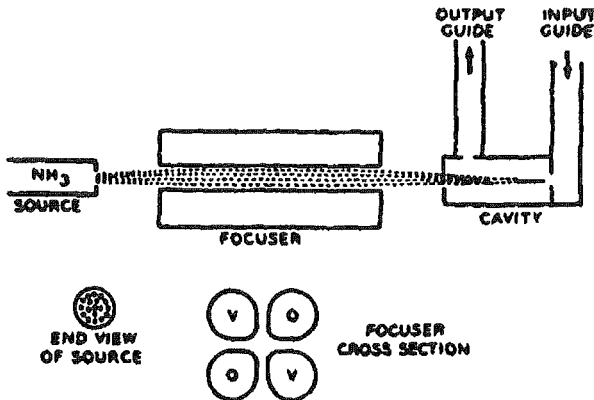
La primera aparición oficial del máser fue en un informe interno, el 30 de enero de 1954 y, posteriormente, en revista (J.P. Gordon, H.J. Zeiger & C.H. Townes, "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of  $\text{NH}_3$ ", *Phys. Rev.* **95**, 282, 1954).

## EL MÁSER: TOWNES (III)



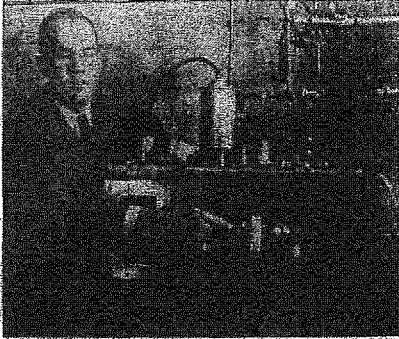
Página del libro de nota de C.H. Townes, en e que se recoge la ide original del máser (11 d mayo de 1951)

Esquema del máser tal y como aparece en e primer artículo.



Simplified diagram of the essential parts of the maser.

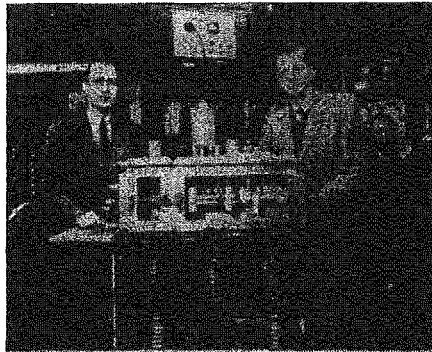
## EL MÁSER: TOWNES (IV)



Charles Townes with the second beam-type maser bulb.

Townes con el segundo máser desarrollado con su grupo.

Townes con Gordon coautor del artículo inicial, y con Wang que reemplazó Zeiger en el grupo cuando éste se fue.



C. H. Townes and T. C. Gordon with the second ammonia maser. T. C. Wang on the right stands by the first maser; 1954.

Townes en una conferencia de la Optical Society of America, en 1981, Washington, D.C. (esquina inferior derecha. Detrás de él, el autor de esta transparencia)



## EL MÁSER: BASOV Y PROKHOROV

A. M. Prokhorov (1916 - ) demostró en su tesis doctora que un sincrotrón podía ser utilizado como una fuente de oscilaciones electromanéticas coherentes en la región de los centímetros. Poco después, al principio de los 50, inició sus trabajos en espectroscopía de radio con un grupo de estudiantes entre los que se encontraba N. G. Basov (1922 ), en el Instituto Lebedev de Moscú. Su interés se centraba en los espectros vibracionales y rotacionales de las moléculas. Para dicho trabajo era preciso aumentar todo lo posible la resolución del espectrómetro de radio. Una forma de hacerlo era variando artificialmente las poblaciones de los niveles entre los que se trabajaba. Sus resultados, muy similares a los de Townes, se publicaron en revistas de la URSS (N.G. Basov y A.M. Prokhorov, "Application of molecular beams to the radio spectroscopic study of the rotation of the rotation spectra of molecules", *Zh. Eksp. Theo Fiz.*, 27, 431, 1954), y no fueron conocidos en Occidente, hasta bastante después.



A 1950 vintage photo of five pioneers of the laser. From left to right: J.P. Gordon, N.G. Basov, H.J. Zeiger, A.M. Prokhorov, and C.H. Townes. Townes, Basov, and Prokhorov shared the 1964 Nobel Prize in Physics.



## EL MÁSER: OTROS NOMBRES (I)

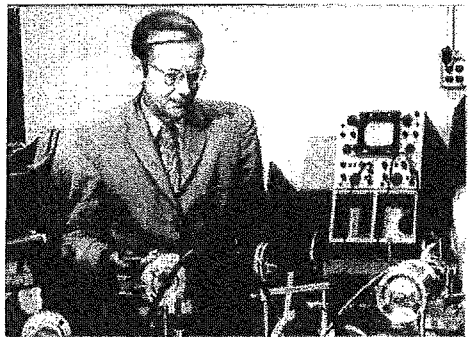


Nicolaas Bloembergen

En 1956, Nicolaas Bloembergen (1920 - ), en la Universidad de Harvard, sugirió un camino alternativo para la obtención de emisión máser: utilizar un sistema de tres niveles, en lugar de dos como había hecho Townes. Para ello empleó materiales paramagnéticos, principalmente cristales de cianuro de cobalto y potasio dopados con cromo ("Proposal for a new type solid state maser", *Phys. Rev.*, **104**, 324, (1956)). Con ello se abrió el camino para el láser. Su trabajo posterior se centró en Óptica No lineal.

En una entrevista en 1985 comentaba porqué no había continuado en el terreno de los láseres. Señalaba que era un tema d demasiada envergadura para ser tratado en una universidad: todo se habían desarrollado en industrias: Hughes, Bell, IBM, Genera Electric, ...

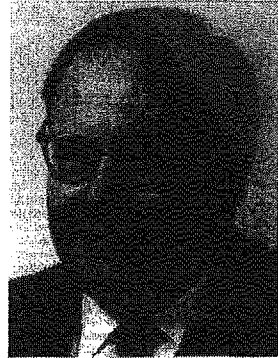
Recibió el premio Nobel en 1981.



Nicolaas Bloembergen in 1974 at work in his Harvard lab.

## EL MÁSER: OTROS NOMBRES (II)

En 1958, Arthur **Schawlow** publicó, conjuntamente con C. Townes, la primera propuesta de un máser en el visible ("Infrared and optical masers", *Phys. Rev.*, **112**, 1940, (1958)). En 1951 había escrito, también con Townes, un libro sobre espectroscopia de microondas. Una de las ideas más fructíferas para la obtención del láser fue el empleo de un resonador de Fabry-Perot como sistema de realimentación. La idea le vino de su tesis, en la que había empleado uno.



Arthur L. Schawlow

(El 29 de enero de 1958, en los labs. de Bell donde trabajaba Schawlow, hizo firmar a su alumno S.L. Miller, en su libreta de notas, que se le había ocurrido la idea de emplear el Fabry-Perot. Era la forma de acreditar su paternidad)  
Recibió el premio Nobel en 1981 por su trabajos en espectroscopia láser.



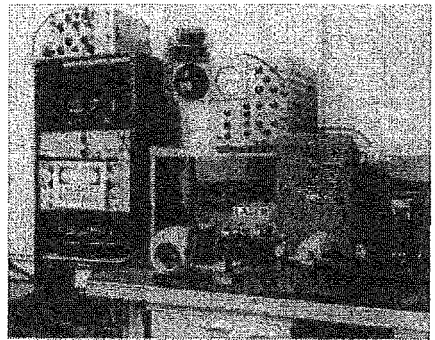
Schawlow demonstrating an early ruby laser with a straight flashlamp and cylindrical reflector, at Stanford University in 1962.



## NACIMIENTO DEL LÁSER: MAIMAN (I)

El primer láser se desarrolló en julio de 1960, en los laboratorio de Hughes Research (California) por Theodore H. Maiman (1927 - ), director del departamento de Electrónica Cuántica. Su tesis se había desarrollado en el entorno de la espectroscopia de microondas.

Como material activo eligió e rubí, que ya había emplead en el desarrollo de un tipo d máser refrigerado co nitrógeno líquido y del qu conocía bien sus características. Pocos creían incluyendo a Schawlow, qu con él se pudiera obtene radiación en el visible.



The laboratory setup for the first ruby laser.

El artículo con sus trabajos fue rechazado por Physics Review Letters, que creyó que no era tema de necesaria rápida publicación. Finalmente lo publicó en dos revistas inglesas (T.H Maiman, "Optical maser action in ruby", *British Communications and Electronics*, **7**, 674 (1960) *Nature*, **187**, 493 (1960))

El desarrollo del primer láser de rubí costó únicamente del orden d \$ 50.000, mientras que otros laboratorios estaban invirtiendo e esas fechas cantidades próximas al millón de dólares. Pued considerarse más un desarrollo de ingeniería que de física aplicada.

NACIMIENTO DEL LÁSER: MAIMAN (II)

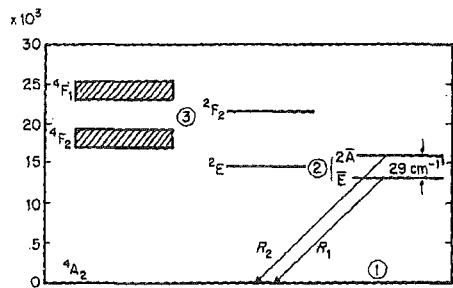
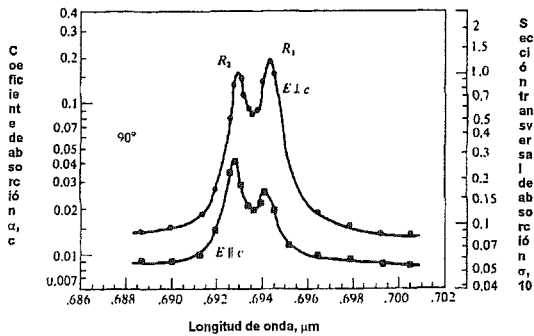
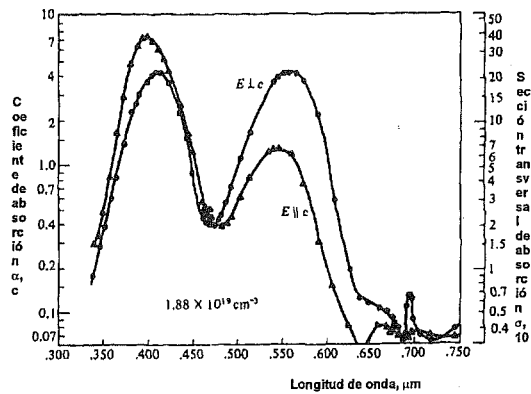


Diagrama de niveles de energía en el rubí

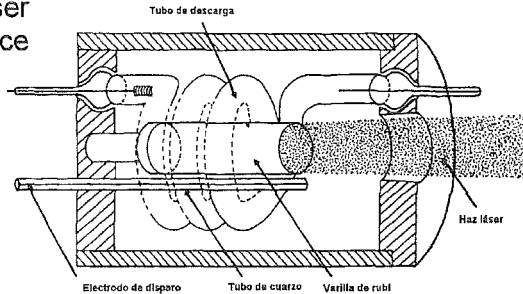
Espectro de absorción en el rubí



Detalle del espectro de absorción del rubí, en el margen de longitudes de onda de interés para la emisión láser (líneas R)

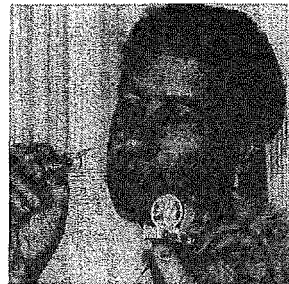
## NACIMIENTO DEL LÁSER: MAIMAN (III)

Esquema del primer láser de rubí, tal y como aparece en el artículo original.

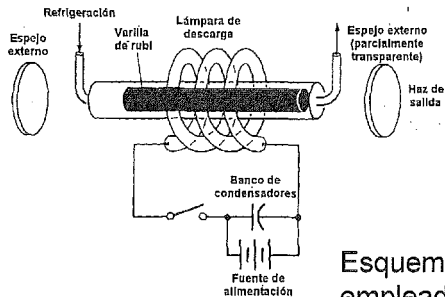


Dr. T. H. Maiman with the first ruby laser.

T.H. Maiman, mostrando su prime láser de rubí.



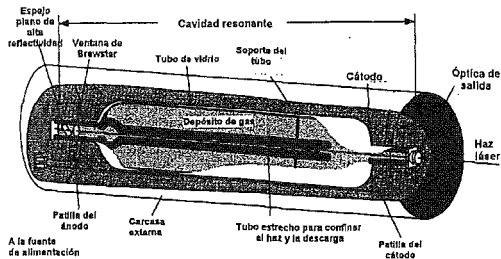
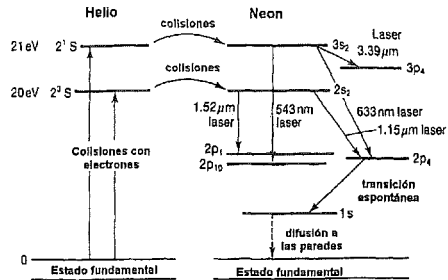
Maiman exhibiendo el primer láser de rubí al público en el Observatorio Lick, agosto 1960.



Esquema eléctrico del circuit empleado.

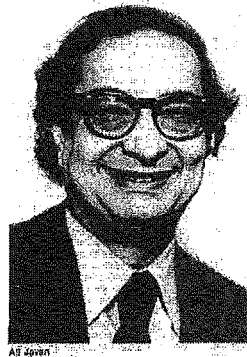
## EL LÁSER DE He-Ne : JAVAN (I)

Niveles del helio y del neó que intervienen en el proceso de emisión láser.

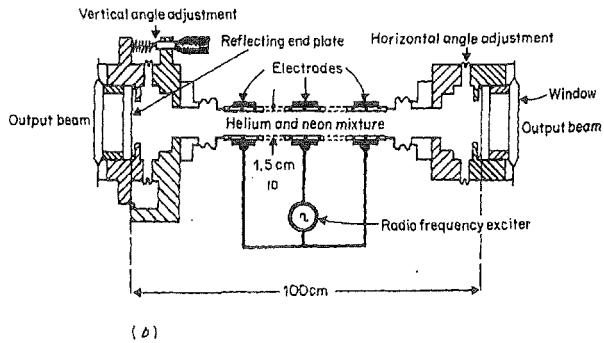


Esquema de un láser de He-Ne con sus partes más significativas.

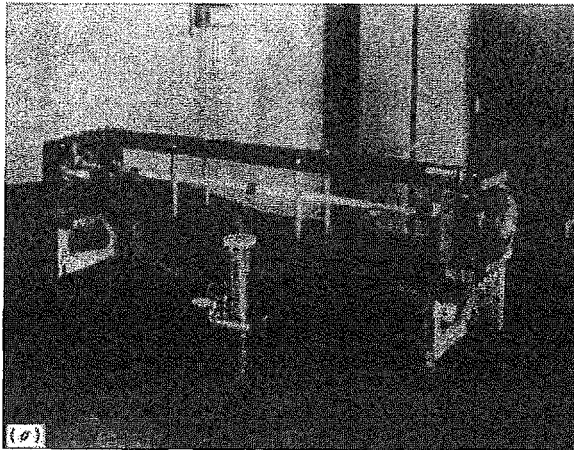
El primer láser de He-Ne se realizó por el grupo de A. Javan en los laboratorios de I Bell. Aunque el artículo en el que daba noticia del hecho apareció un poco después (A Javan, W R Bennett y D R Herriott, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 106 (1961)), el 14 de diciembre de 1960, mediante una célula Kerr, hicieron la primera transmisión de una conversación telefónica.



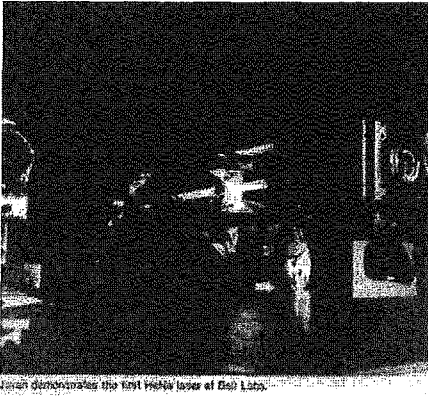
## EL LÁSER DE He-Ne : JAVAN (II)



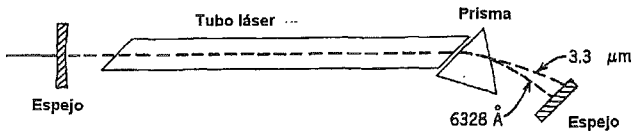
Esquema y montaje del primer láser de He-Ne (D.R. Herriott, J.Opt. Soc.Am. 52,31 (1962))



## EL LÁSER DE He-Ne : JAVAN (III)

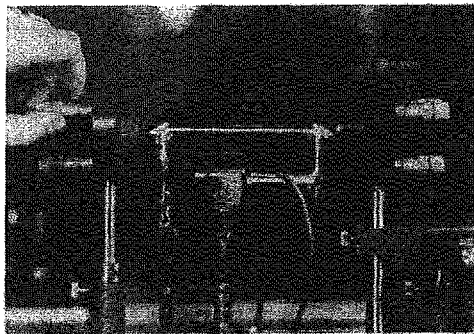


Javan con su primer láser de He-Ne, en los laboratorios Bell donde fu realizado.



Método para seleccionar la longitud de onda de la radiación de salida

Láser de He-Ne con espejos del resonado montados exteriormente al tubo de descarga y ajustados manualmente mediante micromanipuladores







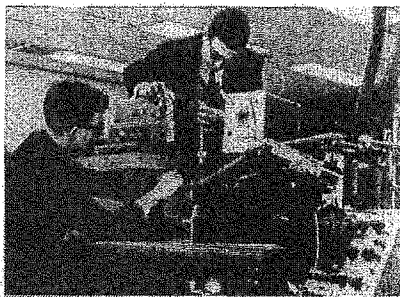
Peter Sorokin

## EL SEGUNDO LÁSER: SOROKIN (I)

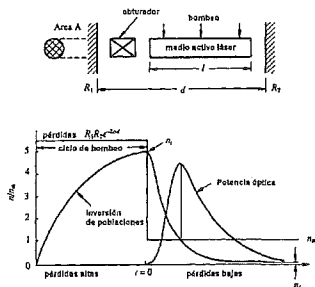
Pocos meses después de la aparición del láser de rubí, Peter Sorokin y M.J. Stevenson presentaron el primer láser de cuatro niveles usando  $U^{3+}$  en un cristal de  $CaF_2$  (emisión a  $2,5 \mu$ ).

P. Sorokin había realizado su Tesis Doctoral bajo la dirección de N. Bloembergen, en Harvard, y posteriormente pasó a trabajar en IBM donde desarrolló el láser anterior y un tercero con  $Sa^{2+}$ . (P.P. Sorokin y M.J. Stevenson, "Stimulated infrared emission from trivalent uranium", *Phys. Rev. Lett.*, **5**, 557, 1960; "Solid-state optical maser using divalent samarium in calcium fluoride", *IBM J. Res. Develop.*, **5**, 56, 1961)

Posteriormente, con el fin de controlar los pulsos que se obtenían de los láseres existentes, ideó la técnica de la conmutación pasiva de Q ("Q-switching") mediante el uso de un cierto tipo de colorante orgánico que absorbían a 694,3 nm. Al introducir una cubeta con él en la cavidad de un láser de rubí, en lugar del usual tren picos, se obtenían pulsos gigantes de una duración de 20 nseg. Con esta base pudo desarrollar, poco después, los primeros láseres estables de colorante ("dye lasers").



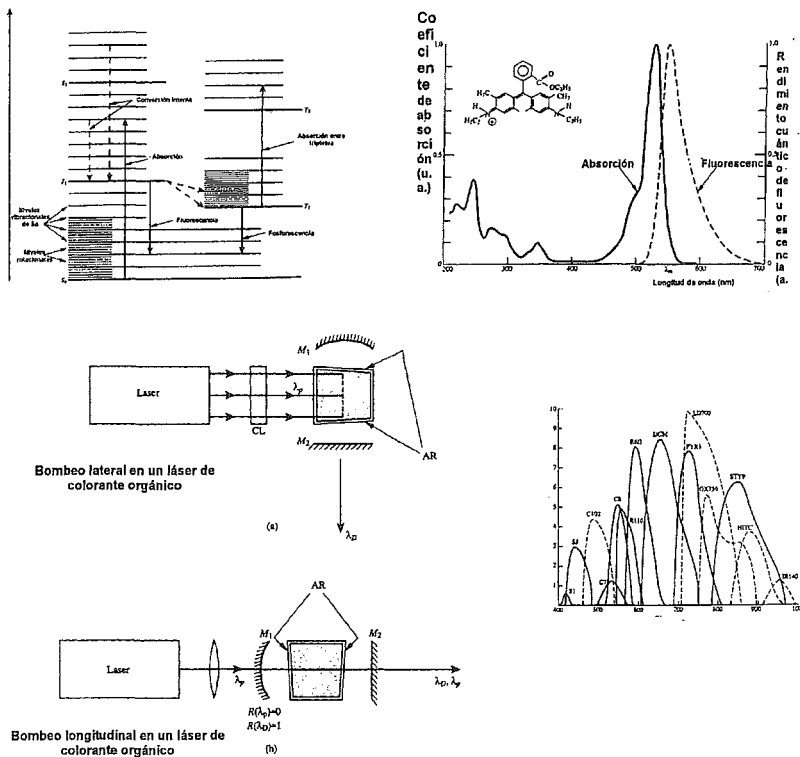
Sorokin and Stevenson build the  $CaF_2:U^{3+}$  laser at their IBM lab. (Soren 1992)



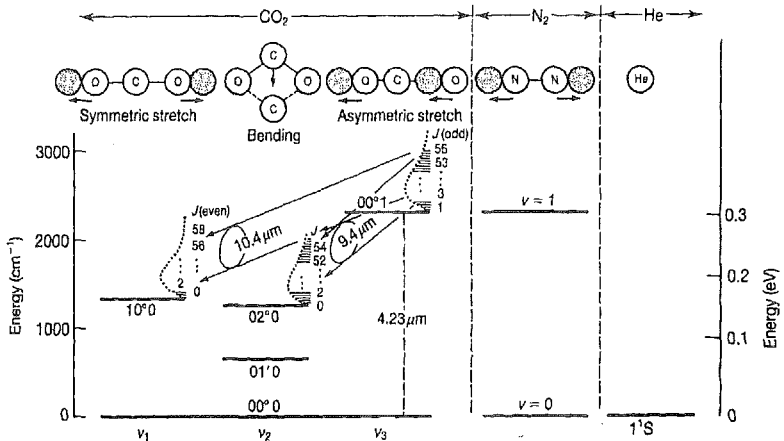
Principio del Q

## EL LÁSER DE COLORANTE: SOROKIN (II)

La primera propuesta para el empleo de materiales orgánico como medios láser fué hecha por Brock y por Rautian Sobel'mann en 1961. Pero la primera realización, con un funcionamiento correcto, se llevó a cabo por Sorokin en 1966 mediante el uso de pulsos gigantes obtenidos a partir de un láser de rubí que bombeaba al colorante CAP (IBM J. Res. Develop. 10, 401, 1966). Un año después obtuvieron también resultados satisfactorios mediante bombeo con una lámpara de descarga.



## EL LÁSER DE CO<sub>2</sub>: PATEL (I)



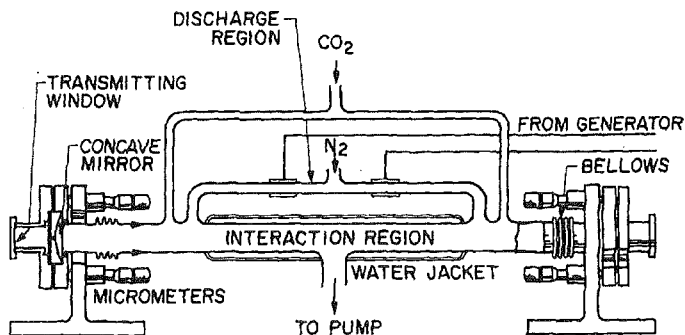
Una de las diferencias más significativas del láser de CO<sub>2</sub> con respecto al de He-Ne es que los saltos de electrones para la generación de radiación se producen entre niveles vibracionales de moléculas y no entre niveles electrónicos. Debido a ello, la longitud de onda emitida es, en general, mayor.

El primer láser de este tipo fue obtenido por Kumar Patel, en 1964. Con un tubo de 5 m de longitud, obtuvo salidas de 1 mW en onda continua con excitación también continua, y picos de 1 mW con pulsos de excitación de 1 μs. En 1965 alcanzaron los 12 W con un tubo de 2 m.

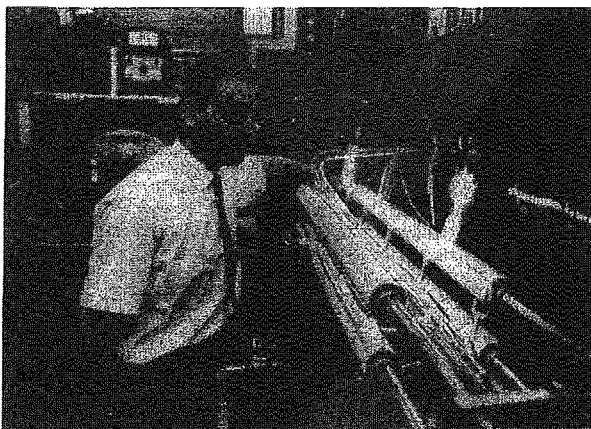


Kumar Patel

## EL LÁSER DE CO<sub>2</sub>: PATEL (II)



Continuous-flow system was used by C. K. N. Patel to verify the hypothesis that a carbon dioxide-nitrogen laser would be efficient than a pure carbon dioxide laser. Strong laser oscillation was obtained in this system on the vibrational-rotational transitions of carbon dioxide even though no electric discharge was present in the interaction region, thereby proving the effectiveness of using vibrationally excited nitrogen molecules for selective excitation of carbon dioxide molecules to the upper laser level.



C. K. N. Patel standing near his CO<sub>2</sub> laser apparatus, 1965.

## LA HOLOGRAFÍA (I)



Dennis Gabor (1900-1979)

El concepto de la Holografía se debe a Dennis Gabor, científico húngar cuyo objetivo inicial era el de mejora la resolución del microscopio electrónico. Su idea, planteada en 1948, se basaba en realizar un holograma del objeto, mediante un haz de electrones y luego reconstruirlo con un haz de luz coherente. (D. Gabor, "Microscopy b reconstructed Wave-Fronts", *Proc. R. Soc. Soc.*, A197 454-487 (1949))

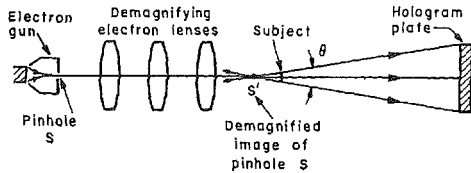
El objetivo no se alcanzó ya que para la reconstrucción, la única forma de obtener en aquellos años una radiación coherente era hacer pasar la emitida por un foco radiante convencional a través de un pequeño orificio. Esto daba lugar a que la intensidad de que se podía disponer era muy pequeña y poco apta para cualquier tipo de procesado. La propuesta de Gabor quedó así, durante muchos años, como una mera propuesta de tan solo interés teórico.

La situación solo cambió con la aparición del láser en la década de los sesenta: éste suministraba tanto la coherencia requerida como una intensidad de luz suficientemente alta.

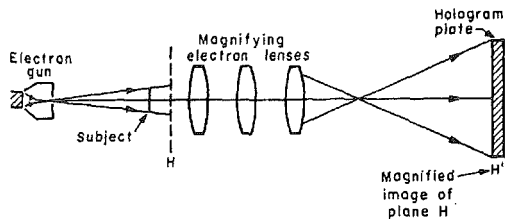
El camino para la Holografía se abrió a raíz de los trabajos de los investigadores de la Universidad de Michiga Emmett N. Leith y Juris Upatnieks, a partir de 1962, en los que mostraron la posibilidad realizar y reconstruir hologramas con los láseres recién descubiertos (E.N. Leith y J Upatnieks, "Reconstructed Wavefronts and Communication Theory", *J. Opt. Soc Am.*, 52, 1123-1130 (1962), "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination on Three Dimensional Objects", *ibid*, 54, 1295-1301 (1964)).

Gabor recibió el Premio Nobel en 1971 por su descubrimiento.

## LA HOLOGRAFÍA (II)

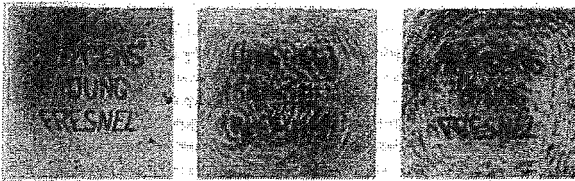


The projection method of forming an electron-wave hologram.



The transmission method of forming an electron-wave hologram.

**Métodos iniciales (de proyección y de transmisión)  
propuestos por Gabor para el registro de  
hologramas mediante un haz de electrones**

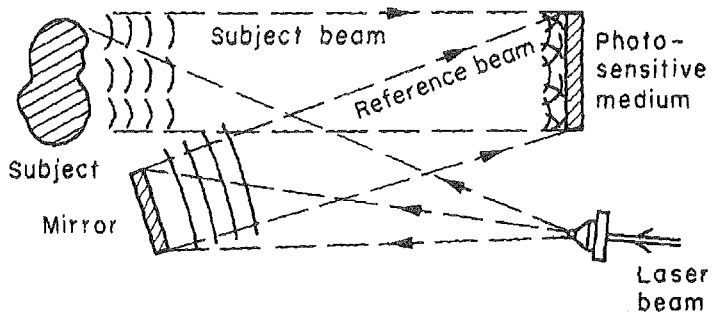


Results of some early optical holography by Gabor. Left: The original subject. Center: The hologram. Right: The reconstruction. (Courtesy D. Gabor, *Nature* 4, 107 (1947).)

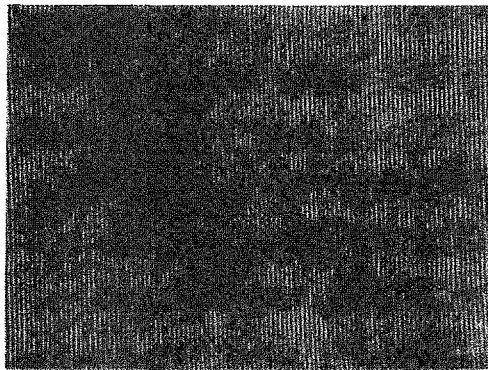
**Uno de los primeros hologramas realizados por  
Gabor con luz de baja coherencia.**

## LA HOLOGRAFÍA (III)

### - REGISTRO HOLOGRÁFICO DE UN OBJETO 3-D



*Formation of a hologram.*

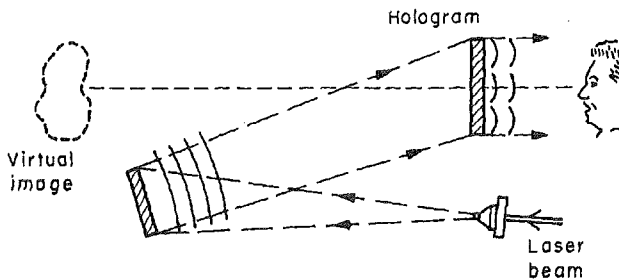


*Photograph of a magnified portion of a hologram.*

Apariencia externa de un holograma sin blanquear

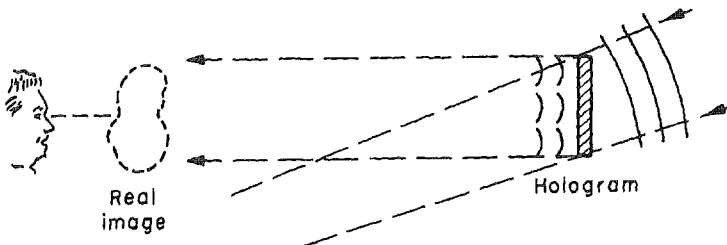
## LA HOLOGRAFÍA (IV)

### - RECONSTRUCCIÓN DEL HOLOGRAMA DE UN OBJETO 3-D



Generation of a virtual image of the subject using the original reference beam to illuminate the hologram.

#### a) DE SU IMAGEN VIRTUAL



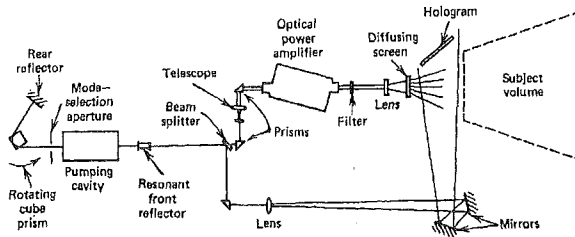
Generation of the real image of the subject using the *conjugate* to the original reference beam to illuminate the hologram.

#### b) DE SU IMAGEN REAL

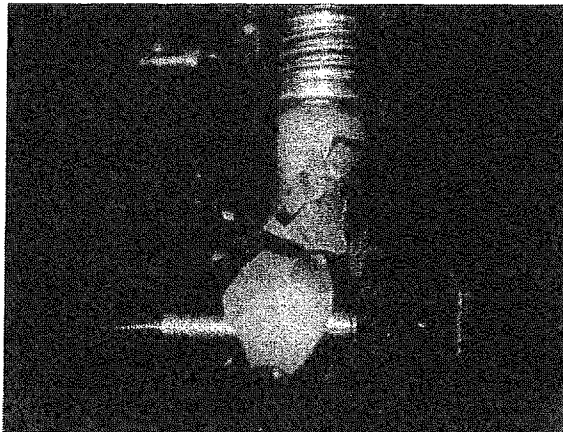


## LA HOLOGRAFÍA (V)

### HOLOGRAFÍA DE PULSOS

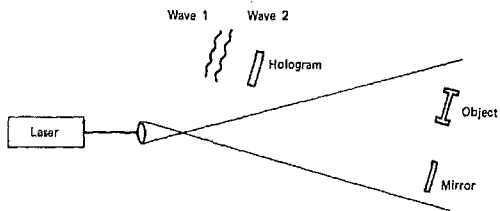


Esquema de una de las primera realizaciones de hologramas de pulsos para el registro de imágenes 3-D instantáneas

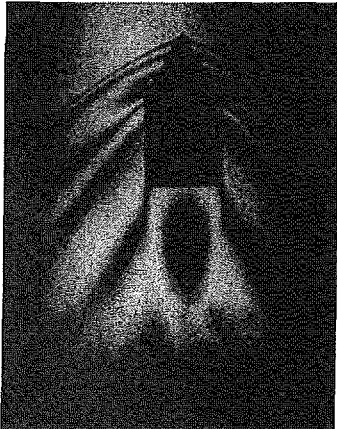


## LA HOLOGRAFÍA (VI)

### HOLOGRAFÍA INTERFEROMÉTRICA

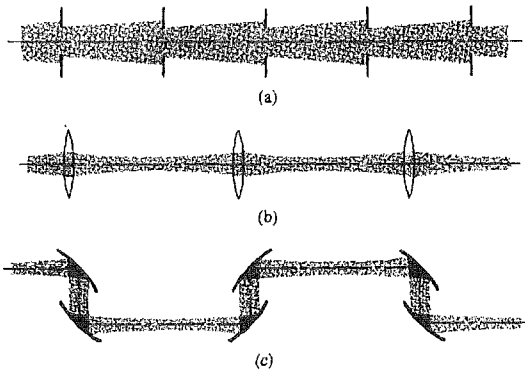


**Esquema simplificado del registro de un holograma interferométrico**

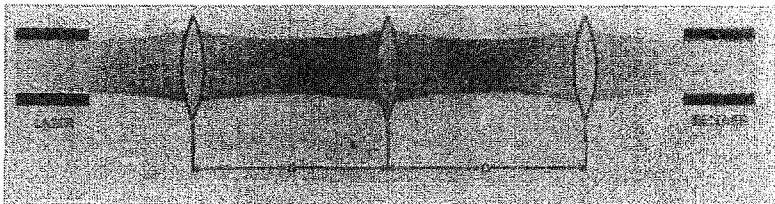


**Registro del paso de un proyectil a través de un fluido. El holograma se realiza mediante doble exposición: una primer con el fluido en reposo y una segunda (instantánea) con el proyectil pasando por él.**

## PROPUESTAS PARA LA TRANSMISIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE UN MEDIO (I)

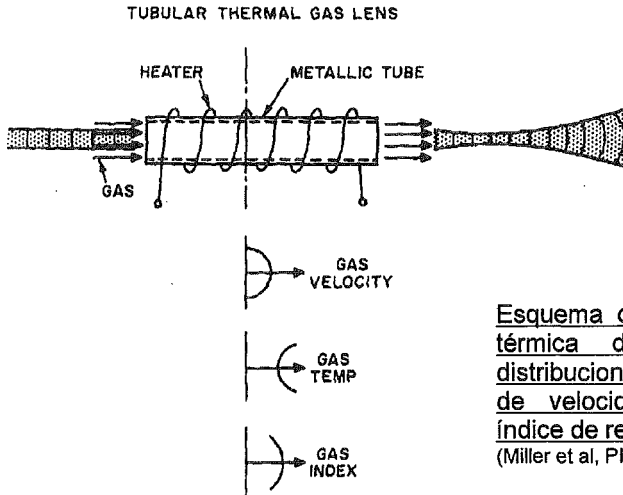


Guiado periódico de luz mediante (a) diafragmas, (b) lentes, y  
© pares de espejos toroidales (Gloge, PIEEE, 58, 1517. 1970)

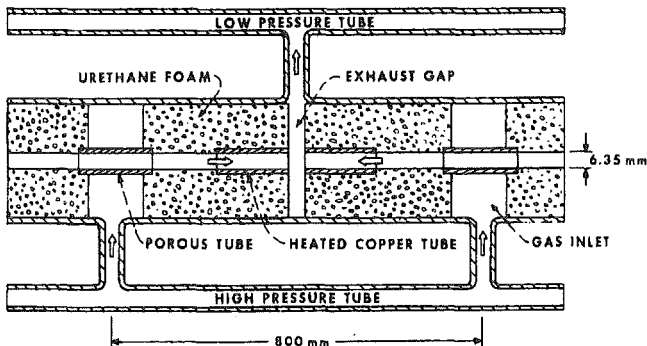


Guía de un haz de luz mediante una secuencia de lentes  
(Miller et al, PIEEE, 54, 1307. 1966)

## PROPUESTAS PARA LA TRANSMISIÓN DE UN HAZ LÁSER A TRAVÉS DE UN MEDIO (II)



Esquema de una lente tubular  
térmica de gas, con las  
distribuciones correspondientes  
de velocidad, temperatura e  
índice de refracción del gas.  
(Miller et al, PIEEE, 54, 1308. 1966)

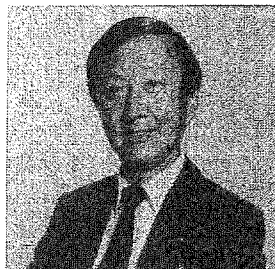


Sección de una lente térmica de gas para guiado de radiación  
óptica. (Gloge, PIEEE, 58, 1519. 1970)

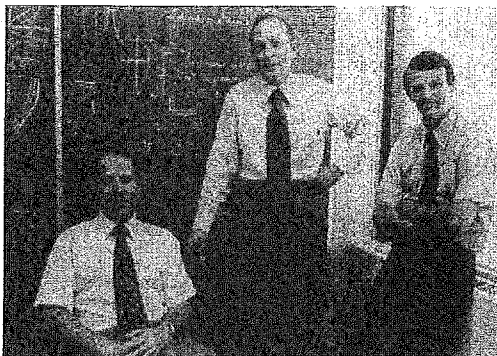
## NACIMIENTO DE LA FIBRA ÓPTICA

Hacia 1965, la atenuación que ofrecían los vidrios existentes al paso de la luz era del orden de los 1000 decibelios por kilómetro. Esa cifra hacía inviable su aprovechamiento como medio para transmitir señales ópticas. Varios investigadores, entre ellos Antoni E. Karbowiak y Narinder S. Kapany, habían planteado el hecho de la reducción de esa cifra mediante una mejora de las propiedades ópticas del material.

En noviembre de 1965, Charles K. Kao y G. Hockham, publicaron un artículo en los *Proceedings of the IEE*, en el que tras un estudio teórico, llegaban a la conclusión de la posibilidad de rebajar la anterior cifra a 20 dB/km, mediante un correcto refinado del vidrio. Esto implicaba que las fibras de  $\text{SiO}_2$  podían ser empleadas como medio transmisor de luz.



Charles Kuen Kao  
(Shanghai, 1933)

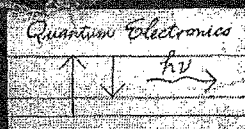
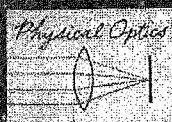


Donald Keck, Robert Maurer y Pete

En septiembre de 1970 R. Maurer y su colaborador enviaron un artículo a una conferencia en Londres que concluía con la frase *"The lowest value of total attenuation observed in all waveguides constructed for this work was approximately 2 decibels per kilometer"*. El camino de la fibra había comenzado.

# Proceedings of the IEEE

OPTICAL COMMUNICATION



Primera portada de los Proceedings del IEEE, en octubre de 1970, dedicada a las Comunicaciones Ópticas: marcaba su nacimiento efectivo

## **1.- EMISIÓN DE LUZ EN SEMICONDUCTORES**

### **1.1.- ANTECEDENTES DEL DIODO EMISOR DE LUZ: H.J. ROUND**

Los orígenes del LED deben situarse entre las muchas mutaciones que surgieron, a principios de siglo, a raíz de la invención de diodos y triodos. La necesidad de dispositivos eficientes en los receptores y emisores de radio condujo a una gran actividad en torno a todo tipo de materiales y estructuras. Entre todas ellas, el primer registro que aparece es uno realizado por H.J. Round, en 1907 en Inglaterra<sup>1</sup>, y que señalaba la aparición de una cierta emisión luminosa en una punta de contacto ("cat whisker"). Round, ayudante en aquel momento de Marconi, colaboraba con él en el desarrollo de receptores de radio de alta sensibilidad. En su anotación de 1907, no solamente describe el fenómeno de la emisión de luz a partir del detector de cristal, sino que asegura que la emisión que ha detectado no guarda ninguna relación con el calentamiento del material y que representa, en consecuencia, una emisión de "luz fría". En el aire quedaba la naturaleza del fenómeno y, de hecho, nadie continuó investigando las propiedades del efecto recién encontrado. La situación de la electrónica en aquel momento se centraba en intentar mantener un ritmo rápido en el desarrollo de receptores de radio, y un dispositivo que solo fuera capaz de dar luz no era de ningún interés. Las necesidades de iluminación, única posible aplicación en aquel momento del efecto, estaban suficientemente cubiertas con las lámparas de filamentos incandescentes. Por ello, Round no debe ser considerado como el inventor del LED aunque sí debería serlo como el descubridor del fenómeno de la electroluminiscencia.

### **1.2.- PRIMER ANALISIS DE EMISIÓN DE LUZ POR SEMICONDUCTORES: O.V. LOSEV**

Tuvieron que pasar quince años para que se volviera a detectar la emisión de luz a partir de un diodo de carburo de silicio. En 1922, en la Unión Soviética, Oleg V. Losev, entonces con diecinueve años, publicó una nueva experiencia en la que detallaba un fenómeno análogo al de Round.<sup>2,3</sup> El diodo que analizó no era un diodo detector de cristal ordinario sino que se trataba de una muestra destinada a osciladores y amplificadores de alta frecuencia realizados con óxido de zinc y carburo de silicio. Pero en este caso, debido a múltiples factores, el descubrimiento no quedó como un único artículo sino que tuvo una incidencia más significativa. Los factores fueron, esencialmente, el carácter de la propia vida de Losev y el entorno en el que se produjo.

Oleg V. Losev (1903-1942) trabajó, desde los 17 años a los 33, como simple técnico en diferentes laboratorios soviéticos de radio. Según comenta E.E. Loebner<sup>4</sup>, a los 22 años, la mayoría de los investigadores no soviéticos, que no lo conocían personalmente, creían que Losev era ya un reputado catedrático. Esto causaba hilaridad a científicos como N.A. Nikitin y L.N. Saltykov, dado que Losev nunca había

---

<sup>1</sup> H.J. Round, "A note on carborundum", *Elec. World*, vol 49, p. 308, 1907.

<sup>2</sup> O.V. Losev, "Behavior of contact detectors; the effect of temperature on the generating contact" (en ruso), *Telegrafia i telefonía bez provodov (TlTbp)*, num. 18, pp. 45-62, Mar. 1923

<sup>3</sup> O.V. Losev, *At the sources of Semiconductor Engineering* (en ruso), publicado póstumamente bajo la supervisión editorial de G.A. Ostrumov. Leningrado: Nauka, 1972.

<sup>4</sup> E.E. Loebner, "Subhistories of the Light Emitting Diodes", *IEEE Trans. Elec. Dev.*, vol. ED-23, pp. 675-699, 1976.

recibido lo que podía denominarse una "educación reglada". En 1938, el Instituto del académico Ioffe le concedió un título de doctor sin haber presentado ninguna tesis. Gracias a este hecho pudo volver a los laboratorios de investigación y abandonar cinco años vacíos, en los que había estado enseñando física elemental en una escuela de Medicina. En 1942 murió de hambre durante el asedio de Leningrado. No había querido abandonar la ciudad en un intento de concluir los trabajos de investigación que estaba realizando en ese momento. En la última carta que escribió, en noviembre de 1941, se lamentaba de que un artículo que estaba concluyendo, sobre un dispositivo de silicio, no podía remitirse desde la oficina en Leningrado de la revista *Journal of Experimental and Theoretical Physics* a la sede central de edición, en Kazan. Decía que el artículo habría de permanecer allí hasta el final de la guerra. El artículo nunca vio la luz y, juntamente con Losev, debe contarse como una más de las víctimas de la Segunda Guerra Mundial.

En su artículo de 1923<sup>5</sup>, el cuarto que publicaba, caracterizaba con detalle la dependencia con la temperatura de la región de resistencia negativa en diferentes detectores de cristal, polarizados en inversa a tensiones continuas menores de 9 voltios. De acuerdo con sus características de ruptura los clasifica en cristales "buenos" y "malos", analizando su comportamiento mediante un modelo que denominó de descarga de arco "frío", puramente electrónico. La incorporación de estos dispositivos en circuitos heterodinos le permitió detectar ondas de radio de 68 m. En ese mismo artículo, enviado en enero y publicado en marzo, indicaba la observación, a simple vista, de una tenue emisión de luz verde cuando la polarización era en inversa (esta tensión se corresponde con la punta de acero negativa con respecto al carburo de silicio). En cambio, cuando era en directa, aunque la corriente fuera mayor, no se percibía un fenómeno equivalente. Un año después Losev dedicó un apartado íntegro a analizarlo con más detalle. Era ya su artículo décimo y lo había remitido para su publicación en septiembre de 1924. El objeto de su estudio eran las "descargas luminosas" que aparecían en contactos de carburo de silicio. En esta ocasión ya empleó microfotografías y gracias a ellas logró determinar que la luz se emitía en una superficie del orden de  $700 \mu\text{m}^2$  y que había una corriente umbral a partir de la cual aparecía la radiación luminosa. Esta corriente era de 0,1 mA, que equivalía a unos 15 A/cm<sup>2</sup>. A pesar de estos resultados, Losev no continuó en ese momento con un análisis más detallado de ellos. La razón era que se encontraba en un momento muy activo dedicado a la fabricación de detectores de ZnO que fabricaba y vendía a 1 rublo y 20 kopecs. Solo volvió a este tema en 1927, cuando las relaciones con su proveedor de material en bruto, que se encontraba en New Jersey, dejaron de ser fluidas y, por otra parte, las válvulas habían progresado de forma significativa y eran ya las verdaderas protagonistas en la tecnología de los receptores de radio.

En 1927 se produjo una reorganización bastante completa de las estructuras de investigación en la Unión Soviética. Losev trabajaba en el NRL (Nizhegorodskaya Radiolaboratory) que había sido organizado personalmente por Lenin en 1918. Tras la muerte de éste, el laboratorio fue transferido desde el Ministerio de Correos y Telégrafos, en el que había adquirido un gran renombre, al recién creado SEC (Consejo Superior Económico) ante cuyo Departamento Científico-Tecnológico (STD) su director, M.A. Bonch-Bruyevich, tuvo que defender los programas existentes. Aunque los trabajos de Losev estaban calificados como unos de los más originales del NRL, únicamente se relacionaron como parte de las publicaciones en el *TITbn Journal*. Esta revista se había incorporado también al organigrama del laboratorio. Toda la ciencia y la tecnología soviética estaban en ese momento centralizadas en el STD del SEC. En 1928, el NRL fue absorbido por el Laboratorio Central de Radio (CRL), de

<sup>5</sup> O.V. Losev, "Further investigation of processes in generating contacts", *TITbn*, num.26, pp. 404-411, Oct. 1924.



Leningrado, y todos sus miembros hubieron de ubicarse en diferentes entornos. Boris Ostroumov pasó a ser el director del Departamento de Física, Tecnología e Instrumentación del Vacío, en el CRL, y Losev se incorporó al grupo de fotodetectores de dicho departamento.

Las razones para la continuidad de los trabajos de Losev en LEDs merecen ser comentadas con algún detalle, por lo que tienen de anticipo a tecnologías de años más tarde. Losev se dio cuenta de que una fuente de luz que necesitaba una tensión tan reducida podía ser un potencial candidato como generador de luz "electrónica" y mucho más si era capaz, como aparentemente lo era, de ser modulada a frecuencias muy altas. Es de señalar que ese momento, la teoría de bandas en los semiconductores, así como la Física Cuántica, estaban dando sus primeros pasos. La intuición de Losev es pues mucho más significativa que si lo hubiera sido unos años después.

Gracias a lo anterior, Losev, con la aprobación de físicos como B.A. Ostroumov, V.K. Lebedinskiy, M.A. Bonch-Bruyevich y, posteriormente, el académico Abram F. Ioffe, continuó sus trabajos sobre las aplicaciones de LEDs en comunicaciones. Entre 1927 y su muerte en 1942 publicó 16 artículos y obtuvo 4 patentes en este campo. Aunque su incidencia directa sobre los desarrollos de treinta años después fuera escasa, merece especial consideración detallar algunos de sus descubrimientos, sobre todo por lo que tienen de anticipación de futuro.

### 1.2.1.- Desarrollos de Losev

Uno de los hechos más significativos en los que incidió fue la determinación de que la luz emitida mediante polarización directa (lo que denominó "descarga II") e indirecta ("descarga I") eran fenómenos esencialmente distintos. Este hecho lo determinó merced a las características I-V, I- $\Phi$ , de emisión espectral y espaciales. Su metodología fue la misma que la empleada en 1958 y 1959 en los laboratorios americanos que trabajaban en estos temas, como los de la RCA. Es importante señalar que las uniones p-n, necesarias para la emisión de luz, no eran obtenidas de manera intencionada, sino fruto únicamente del proceso de crecimiento del cristal (que no era monocristal). Y esto que ocurría en los trabajos de Losev, en la URSS de los años 30, ocurrió también en los estudios de los años cincuenta en USA. Losev determinó que la luz podía llegar a ser modulada hasta frecuencias de al menos, 78,5 kHz. Este valor lo determinó con un instrumento de medida de espejo rotatorio, que no alcanzaba frecuencias superiores y que, en consecuencia no le permitía conocer la frecuencia real que podría alcanzar. Entre los fenómenos que observó se encontraba una variación del color de la radiación emitida. En el caso del diodo polarizado en directa (el tipo II mencionado antes) el color se desplazaba del naranja hacia el violeta según se incrementaba el voltaje aplicado, mientras que la emisión de luz no dependía de la temperatura. Además de ello encontró que la emisión no dependía de las condiciones de la superficie del cristal sino que era una propiedad del mismo material. A partir de ello determinó que la emisión de luz en el caso de polarización directa en diodos de SiC era semejante a la catodoluminiscencia de este material.

La caracterización de las propiedades como LED del SiC fueron posteriormente analizadas en un nuevo artículo en abril de 1929<sup>6</sup>. Para ello utilizó las ecuaciones de la teoría cuántica del efecto fotoeléctrico de Einstein diferenciando entre el voltaje total aplicado al diodo y la caída en IR en su interior. Apreció que el límite inferior en longitud de onda del espectro de la radiación emitida por el diodo era

---

<sup>6</sup> O.V. Losev, "Influence of temperature on the glowing carborundum contact. On the application of quantum theory to the phenomenon of detector glow", *TITbp*, vol 53, num. 2, pp. 153-161, abril 1929.

aproximadamente igual a la caída de tensión que caía internamente y que identificó como la zona activa en la que se generaba la luz. Excepto en el caso de altos voltajes, la energía emitida por los fotones, medida en eV's, era solo 1,5 % más pequeña que el voltaje medido. Con ello, Losev dedujo correctamente que la emisión LED obedece una ley del tipo Stokes y representa un caso inverso del efecto fotoeléctrico de Einstein. Losev escribió a éste último informándolo de lo que había descubierto y pidiéndole ayuda para desarrollar una teoría de este hecho basada en la función de trabajo.

La segunda contribución significativa de Losev fue el descubrimiento y caracterización de las propiedades de capas activas muy finas en monocristales de SiC. estas capas eran las responsables de la emisión de luz. En un artículo publicado en 1930<sup>7</sup> indica que *"En la mayor parte de los casos la capa luminiscente de descarga tipo II (polarización directa) se encuentra rodeada de forma nítida por la zona oscura del resto del cristal. Está situada paralelamente a la cara plana activa del cristal. La descarga II tiene lugar solamente con el paso de corrientes perpendiculares al plano de la capa luminiscente que es paralela a la superficie del cristal"*. En la Figura 1 puede verse una reproducción de la publicada en su artículo y una breve descripción del fenómeno observado. Losev indicó que, en los cuatro casos estudiados, el espesor de la capa activa de SiC estaba siempre entre 4 y 20  $\mu\text{m}$ . Determinó el perfil de conductividad de la misma, mostrando un mínimo en el borde de la capa interna.

La descripción de Losev puede interpretarse de una manera mucho más concreta a la vista de los trabajos realizados posteriormente. Así, es conocido por todos aquellos que han trabajado con semiconductores basados en carburo de silicio

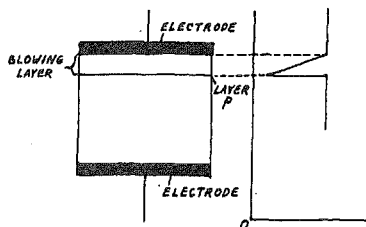


Fig. 1.- Esquema del primer trabajo de Losev, con su descubrimiento de que la emisión de luz tipo II tiene lugar en la capa de alta resistividad de monocristales de SiC.

que cuando este se dopa con aluminio, pasando así a ser tipo  $p$ , es oscuro, mientras que cuando se dopa con nitrógeno, siendo en consecuencia tipo  $n$ , es verdoso claro u oscuro, dependiendo de la intensidad del dopado. Sin tener ninguna idea de lo anterior, Losev describió y caracterizó lo que sería una unión  $p$ - $n$ , en un seminario en la CRL, dado el 28 de junio de 1930. En artículos posteriores, publicados entre 1931 y 1932, presentó modelos más elaborados del comportamiento de esas capas activas internas en diferentes semiconductores, no solo en SiC

sino también en otros más complejos como  $\text{Ag}_2\text{S}$ ,  $\text{Ag}_3\text{SbS}_2$  y  $\text{Ag}_3\text{AsS}_3$ . Explicó las propiedades del LED de SiC con un modelo de tres capas conductoras, caracterizando al cristal de apariencia oscura (el tipo  $p$ ) como un material con alta concentración de electrones con un camino libre medio pequeño (lo que ahora se denomina de "baja movilidad") mientras que las dos capas activas poseían baja concentración de electrones de grandes caminos libres medios (alta movilidad).

El modelo de Losev se diferencia de lo que actualmente se conoce en tan solo un hecho, aunque significativo: no encontró la conducción de huecos (tipo  $p$ ) en el

<sup>7</sup> O.V. Losev, "Glow II, electrical conduction of carborundum and unipolar conductance of detectors", presentado en el CRL, 28 de junio, 1930. *Vestnik Elektrotehniki*, vol 8 pt. I., pp.247-255,268.

semiconductor oscuro. A pesar de ello, teniendo en cuenta el conocimiento que se tenía en 1930-31, a nivel mundial, de los semiconductores, el aislamiento característico de los científicos soviéticos y las dificultades tenidas por Losev por los cambios estructurales que antes se han comentado en las estructuras administrativas científicas de las URSS, resulta increíble lo obtenido por él. Y mucho más increíble resulta todavía el escaso eco que han tenido sus trabajos, no solo en Occidente sino también en su propio país. Hasta muy recientemente, los mismos historiadores rusos

длины каналов которого  $1,85 \cdot 10^{-4}$  а). По ее значению и построены кривые 1-4, относящиеся к зондам (рис. 5,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ ). Кривые 1-4, выделенные на второй части монохристалла (рис. 6), разломленного на две части. Толщина всего монохристалла  $315 \text{ мкм}$ , на активной слой приходится  $11 \text{ мкм}$ . Характеристики зондов также были сняты по рисунку 5, раз для контроля — по нестесненным каналькам-либо зонд во время снятия кривых.

По рис. 5 можно быть проследить роль отдельных слоев активного слоя. Мы видим, что падение интенсивности ленточнолучного излучения и зависимости от направления тока для ленточных полупроводников слоев  $p$  (см. диаграмму рис. 1) активного

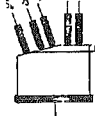
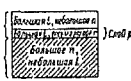


Fig. 6



Page 7.

слоп. Эти слош — между зонами  $S_2$  и  $S_4$  на рис. 6, на рис. 5 несимметричные части эллиптизованы.

Надлежаще принципа и толщине кристалла симметрично, а при малых и средних плотностях тока для толщине справедливы даже закон Ома. Надлежаще потенциалы в месте контакта сглаженного электрода  $\mathcal{E}$  (рис. 5 в д) и верхней области актинового слоя незначительно и только симметрично (рис. 5, кривая 2). Такии образцы, зыпиринительное действие не может быть отнесено ни за счет контакта, ни за счет толщине или количества толщине со вторым электродом большой поверхности — нижнему на рис. 1, 4, 6.

Протекание уипольной проводимости и вы-  
прямительного действия связано со свойствами особого  
активного слоя. Оно может быть объяснено различием  
энергии  $eU$  электронов проводимости, приобретаемой ими  
на длине их свободного пути при движении с той или  
другой стороны к слою  $p$  (рис. 1) в зависимости от на-  
правления тока. В соответствии с этим получаются раз-

ՀԱՅԿԻ և ԻՐԱԿԵՐ ՄԱՐԿԵԿՈՒ ՈՐԿԱՆԻԶԱՐԻՆ ԱԼԵԿՍԱՆԴՐՈՎ  
և ՎԼԱԾ ԲՐԱՆՆԻՔԻՑ ԸՆԴԵ Ր,<sup>4</sup>

Ключи считают, даже, что средние длины свободных ивты для всех слоев crystals одинаковы, различие  $\sigma_{\text{IV}}$ , возникающее вследствие несимметричного распределения градиента потенциала, который имеет значительно большую величину даже для средних слоев аннигиного слоя, чем для толстых (т. е. по обеим сторонам от слоя в см. рис. 1 и 2).

Механизм действия такой системы прописан, если предположить, что верхние слои активного слоя образуют большие удельной проводимостью за счет большой средней длины свободного пути  $L$  при сравнительно высокой концентрации свободных электронов  $n$ . Большие же удельная проводимость толщ обусловлена малой  $L$  при большой  $n$ . Схематически эти условия показаны на рис. 7.

Предположение о большой  $L$  для областей с рис. 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841

Длина  $L$  для активного слоя при низких (атмосферный воздух) и комнатных температурах получается порядка одного или нескольких микронов. Спектротраграммы показывают, что  $L$  уменьшается с увеличением температуры и активного слоя. Как известно, для металлов, согласно Замперфельдовой теории металлической проводимости,  $L$  также должна уменьшаться с повышением температуры.<sup>6</sup>

Позже мы увидим, что предположение о большой  $L$  в  
низкой  $n$  для активного слоя и противоположное — для

<sup>4</sup> Cp.: W. Schottky, R. Stürmer u. F. Waibel, *Jahrb. d. drahtlosen Telegraphie u. Telephonie*, 1931, 37, SS. 102, 175; W. Schottky, *Phys. Zeitschr.*, 1930, 31, S. 913; O. V. A. Nwars, H. Kirschbaum, *Ann. d. Phys.*, 1930, 7, S. 129; W. Vogl, *Ann. d. Phys.*, 1930, 7, S. 183.

43; 2) *J. Chem. Phys.*, 1928, 61, S. 1171; 3) *Учен. зап. киев. ун-та*, 1928, 8, стр. 765.

**Fig. 2.- Reproducción de las págs. 126 y 127 de <sup>3</sup>.** En la Fig. 6 aparece las puntas de medida en la región emisora de luz de los diodos de SiC. En la Fig. 7 se muestra el esquema de tres capas eléctricamente diferentes en un monocristal.

apenas han dado el peso requerido a lo que Losev había obtenido. Losev trabajó en el desarrollo de las comunicaciones ópticas, como no se había hecho antes. Para ello trabajó tanto en LEDs como en fotodetectores y en muchos casos su trabajo se adelantó en más de 40 años a su tiempo. Por otra parte, sus artículos describen de una manera tan detallada lo que hizo que no es difícil hoy seguirlo paso a paso, tanto en lo que se refiere a su diseño de los experimentos como a la increíble intuición que aplicó en todo momento.

### 1.3.- ETAPA INTERMEDIA: K. LEHOVEC

Casi treinta años tuvieron que pasar para que se pudiera realizar una primera interpretación del fenómeno de la emisión de luz en cristales de carburo de silicio mediante la aplicación de pequeños voltajes. La razón de ello se debió a que no era necesario solo tener claro cuál era el proceso para la emisión de luz sino que también era preciso conocer cuáles eran los mecanismos de conducción en las uniones  $p-n$ . La

primera interpretación de todo lo anterior la dió Kurt Lehovec y su equipo en el Fort Monmouth Signal Corps Engineering Laboratory. En 1952, Lehovec publicó un artículo<sup>9</sup> en el que sintetizaba estas dos líneas. Poco después<sup>10</sup>, publicaba otro, en el que en la sección titulada "Light Emission Due to Recombination of Injected Carriers", daba la siguiente conclusión de todos sus trabajos: "*Recently<sup>9</sup> a new type of semiconductor light source was described. The light source consists of a combination of a p-n barrier and a phosphor. The excitation process consists of injection of carriers over the p-n barrier by passing a current in the forward direction. The light emission results from the recombination of these carriers*". Lehovec habían así sintetizado las dos corrientes existentes en ese momento en física del estado sólido, luminiscencia y teoría del diodo. Shockley no había hecho tal cosa en su clásico artículo de 1949<sup>11</sup>, en el que había establecido la teoría de las uniones p-n pero sin considerar los descubrimientos realizados hasta 1947 relacionados con los efectos fotoeléctricos existentes en dichas uniones y que habían sido encontrados en el germanio y en el sulfuro de plomo.

Pocos meses después de la publicación de Lehovec, Haynes y Briggs, de los Laboratorios de la Bell, demostraron<sup>12</sup> la existencia del fenómeno de la recombinación radiante en uniones p-n de germanio y de silicio a bajas temperaturas. Con ello se planteó el hecho de que la explicación dada para la emisión de luz en diodos de SiC era al menos plausible, sino totalmente correcta. Poco después, Van Roosbroeck y Shockley<sup>13</sup> profundizaron en la explicación de Lehovec derivando el espectro de emisión de fotones a partir del espectro de absorción del semiconductor. Pero la teoría no era todavía satisfactoria dado que el concepto de estructura de bandas de gap indirecto todavía estaba en sus albores.

Como último hecho que es necesario mencionar aquí aparece el del término con el que este nuevo campo se comenzó a denominar. En la década de los cincuenta, tras algunas tentativas sin éxito, se acuñó el nombre con el que ha sido conocido este entorno desde entonces: el de Optoelectrónica. El término "optoelectrónica" fue empleado por primera vez en 1953, por E.E. Loebner, apareciendo impreso en 1955<sup>14</sup> y definido en su totalidad en 1959<sup>15</sup>.

<sup>9</sup> K. Lehovec, C. A. Accardo y E. Jamgochian, "Injected light emission of silicon carbide crystals", *Physical Review*, vol. 83, pp. 603-607, agosto 1951.

<sup>10</sup> K. Lehovec, C. A. Accardo y E. Jamgochian, "New photoelectric devices utilizing carrier injection", *Proc. IRE*, vol 43, pp. 1407-1409, nov. 1952.

<sup>11</sup> W. Shockley, "Theory of p-n junctions", *Bell Syst. Tech. J.*, vol 28, pp. 435-489, julio 1949.

<sup>12</sup> J.R. Haynes y H.B. Briggs, "Radiation produced in germanium and silicon by electron-hole recombination", *Bull. Amer. Phys. Soc.*, vol. 27, p. 14, *Phys. Rev.*, vol. 86, p. 647, may., 1952.

<sup>13</sup> W. van Roosbroeck y W. Shockley, "Photon radiative recombination of electrons and holes in germanium", *Phys. Rev.*, vol. 94, pp. 1558-1560, jun. 1954.

<sup>14</sup> E.E. Loebner, "Opto-electronic devices and networks", *Proc. IRE*, vol 43, pp. 1897-1906. Dic. 1955.

<sup>15</sup> E.E. Loebner, "Solid-state opto-electronics", *RCA Review*, vol 20, pp. 715-743, Dic. 1959.

## 2.1.- PRIMERA PROPUESTA DE AMPLIFICACIÓN DE LUZ MEDIANTE EMISIÓN ESTIMULADA: JOHN VON NEUMANN



En el verano de 1953, John von Neumann y Edward Teller discutieron las posibilidades de amplificar luz mediante el uso de la emisión estimulada. En septiembre de ese año, von Neumann envió al segundo un manuscrito en el que le planteaba sus ideas a tal respecto con el ruego de lo analizara y viera posibles críticas y sugerencias. Había enviado el original del artículo a Livermore y él, ante una reunión sobre reactores nucleares que iba a tener lugar en Washington el 21 de ese mes, y a la que posiblemente también iría Teller, llevaría también otra copia consigo para discutirla con él si hubiera leído y analizado ya su trabajo. En la carta de remisión a Teller le recalca que es simplemente un borrador, sin todavía forma de verdadero artículo. Señala que hay muchas cosas no claras y que, quizás, ha hecho demasiados cálculos lo que dificulta separar las partes esenciales de las incidentales. Concluye su carta a Teller con un párrafo que sintetiza el estado de sus ideas: *"I think that it will be better to enter into that phase of the discussion after we have satisfied ourselves as to the sanity of this scheme, or of a better one"*. De acuerdo con todas las referencias existentes, von Neumann nunca volvió a hablar con Teller del tema, ni tampoco retomó sus ideas en los años siguientes. El manuscrito quedó archivado y solo salió a la luz su existencia cuando, en 1963, John Bardeen editó el Volumen 5 de las "John von Neumann Collected Works". Allí, Bardeen hizo una breve sinopsis

[illegible]

Re: Edward Weiss                                 +3A                                 November 18, 1953

be better to vote in--that phase of the discussion after we have satisfied ourselves as to the timing of this action, or at a better one.

\*\*\*\*\*

WILLIAM WEISS.

2. Original letter, dated September 19, 1953, from von Neumann to Dr. Edward Teller, reproduced from the collections of the Manuscript Division, Library of Congress.

del trabajo de von Neumann pero el texto íntegro no fue publicado. Esta publicación debió esperar a 1987, año en el que R. D. Dupuis finalmente le ofreció a la luz pública<sup>1</sup>.

En su artículo, von Neumann plantea como posible forma de obtener emisión estimulada la inyección de portadores en una unión p-n. Aunque von Neumann no dice nunca, de forma explícita, "unión p-n" queda claro en sus líneas que esa era la idea que tenía en mente. Así, en la sección X de su manuscrito calcula las velocidades de transición radiante entre dos zonas de Brillouin,  $B_1$  y  $B_2$ , en la que existen más electrones que huecos en una, la  $B_1$ , lo que implica un semiconductor tipo n, y más huecos que electrones en la otra, la  $B_2$ , esto es, un semiconductor tipo p. Los comentarios que hace Bardeen al trabajo de von Neumann quedan sintetizados en el siguiente párrafo:

*"By various methods, for example by injection of minority carriers from a p-n junction, it is possible to upset the equilibrium concentration of electrons in the conduction band and holes in the valence band. Recombination of excess carriers may occur primarily by radiation ... The rate of radiation may be enhanced by incident radiation of the same frequency in such a way as to make an amplifier"*<sup>2</sup>

Resulta bastante evidente que von Neuman tenía bastante clara la idea de amplificar luz mediante emisión estimulada. Y este concepto era, no hay duda, el que posteriormente dio lugar al LASER. El planteamiento de von Neumann, es preciso volver a destacarlo, se hizo en 1953, un año antes de que Gordon, Zeiger y Townes publicaran su obtención del MASER.

El hecho real era que en los años en los que von Neumann planteó su idea apenas se sabía nada de los compuestos III-V. El mayor énfasis se había dado, en esos años, al estudio de la alta movilidad de los electrones en la banda de conducción y apenas se había concedido importancia al hecho de que, para determinadas composiciones, esos semiconductores podían presentar transiciones directas lo que constituía el camino inmediato para una gran eficiencia en la emisión de luz. Prácticamente, hasta finales de 1954 no se confirmó, por parte de Frank Herman, la estructura de bandas en el Ge y en el Si. Igualmente, hasta 1954 no se determinó, mediante análisis de la absorción óptica, que las transiciones en estos materiales eran indirectas. Los cálculos de von Neumann asumían transiciones directas, lo que no era aplicable al Ge ni al Si. Esta era una de las preguntas que hacía a Teller en su carta: si la suposición de las transiciones directas en el germanio y el silicio era correcta. Por otra parte, en su cálculos planteaba una geometría esférica sin los requisitos de una cavidad resonante. En cualquier caso, como de nuevo dice Bardeen en su resumen del trabajo de von Neumann, *"It was an idea ahead of its time"*.

## **2.2.- PRIMERAS PATENTES DE SEMICONDUCTORRD COMO MATERIALES LÁSER: Y. WATANABE & J. NISHIZAWA Y BOYLE & THOMAS.**

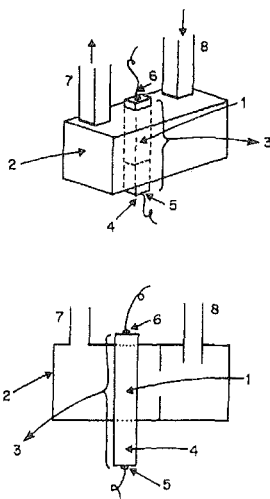
Una de las primeras patentes de que se tienen noticia, relacionada con el uso de un semiconductor como material activo para emisión de radiación coherente, fue la presentada por Y. Watanabe y J. Nishizawa, en Japón. Esta patente fue presentada el 22 de abril de 1957 y publicada después el 20 de septiembre de 1960<sup>3</sup>. Su patente se titulaba "Máser de semiconductor" y en ella se consideraba, como ejemplo específico,

<sup>1</sup> John von Neumann, "Notes on the Photon-Disequilibrium-Amplification Scheme (JvN), September 16, 1953", *IEEE JQE*, 23, pp. 659-673, jun. 1987.

<sup>2</sup> "John von Neumann Collected Works", vol 5. A.H. Taub, Gen. Ed. New York: Macmillan 1963.

<sup>3</sup> Patente japonesa núm. 273217, de 20 de septiembre de 1960, Yasushi Watanabe y Jun-ichi Nishizawa. Apl. núm. 32-9899 presentada el 22 de abril de 1957: "Semiconductor maser".

la radiación por recombinación en telurio dopado con cloro, a una longitud de onda de alrededor de 4  $\mu\text{m}$ . De una forma muy inocente, los autores introducían al semiconductor en una cavidad resonante análoga a la empleada en la región de las microondas, por Townes y su equipo. El esquema presentado en su patente aparece en la Fig. . Sí planteaban por el contrario, el concepto de usar la inyección de portadores para, mediante su recombinación, obtener la correspondiente radiación. Otros material que planteaba como posibles era el silicio dopado con boro. La patente discute también el uso de una unión p-n con el fin de incrementar la eficiencia de inyección de portadores al estado de mayor energía del semiconductor. Estos portadores serían generados mediante la absorción de luz a partir de una fuente óptica de bombeo.



Poco después, fue concedida otra patente relacionada con un posible láser de semiconductor, a William Boyle y David Thomas, de los Laboratorios de la Bell. Esta patente fue presentada el 11 de enero de 1960 y en ella se discutía la posible obtención de efecto láser en Si, Ge, GaP y CdS, mediante emisión estimulada a partir de estados excitónicos a bajas temperaturas. Planteaban que *"the pumping can be either by the injection of minority carriers across a p-n junction within the semiconductor or by any incident ionizing energy suitable for producing hole-electron pairs in the semiconductor ...."*<sup>4</sup>. Discuten, asimismo, los requisitos para usar una cavidad óptica con la que obtener el efecto másér óptico y sugieren que se emplee *"the semiconductor wafer as a mode isolator by treating the surface of the wafer so as to favor selectively the growth of a longitudinal mode"*. Es claro, de todo lo anterior, que Boyle y Thomas tenían el concepto de inyección de portadores minoritarios mediante el uso de una

unión p-n y también el de configurar una cavidad óptica mediante el uso del propio semiconductor como resonador óptico. Estos conceptos, como se vio después, fueron los decisivos para la obtención final del láser de semiconductor.

### 2.3.- APORTACIONES PREVIAS AL NACIMIENTO DEL LÁSER

Según la mayor parte de las referencias, la primera idea presentada en público sobre la posibilidad de obtener luz coherente a partir de un semiconductor fue hecha por Pierre Aigrain, de la Ecole Normale Supérieure, en junio de 1958<sup>5</sup>. Aigrain había discutido previamente, en 1956, con Jacques Pankove, de los Laboratorios de la RCA, la posibilidad de conseguir un láser de semiconductor. Más o menos al mismo tiempo, En el Instituto Lebedev de la URSS, en julio de 1958, Basov, Krokhin y Popov,

<sup>4</sup> W.S. Boyle y D.G. Thomas, *"Optical maser"*, US Patent 3059117, presentada el 11 de enero de 1960 y concedida el 16 de octubre de 1962.

<sup>5</sup> P. Aigrain, ponencia en la *Int. Conf. Solid State Phys. Electron. Telecommun.*, Bruselas, 1958. El artículo correspondiente no aparece publicado en los *"Proceedings"* de dicha conferencia. El detalle exacto de lo allí expuesto únicamente se conoce por referencias de los asistentes y algunas discusiones posteriores entre Aigrain y J. Pankove, de la RCA.

llegaron de manera independiente a una idea equivalente<sup>6</sup>. Pero aunque estos investigadores sugirieron que era teóricamente posible obtener inversión de poblaciones en un semiconductor, no estaba todavía claro qué tipo de semiconductor sería necesario emplear ni qué tipo de transiciones electrónicas eran las que deberían ser empleadas. Además de lo anterior, en los artículos de todos ellos no aparecía aun el concepto de realimentación ni la necesidad de una cavidad electromagnética.

La primera aportación real al conocimiento de los requisitos para la obtención de emisión estimulada en un semiconductor fue la desarrollada por Bernard y Durauffourg, del CNET francés, en 1961<sup>7</sup>. Para ello emplearon el concepto de "cuasi-niveles" de Fermi para obtener, de manera correcta, las ecuaciones que determinaban el inicio de la emisión estimulada en un semiconductor. En su artículo sugirieron, para obtener dicha emisión estimulada, el análisis experimental de materiales de transición directa, como el InAs o el InSb, o transiciones entre la banda de conducción y estados de aceptores del Zn y del In en semiconductores indirectos como el Ge o el Si. Aunque esta última sugerencia se probó posteriormente que era incorrecta, Bernard y Durauffourg fueron los primeros en publicar, de una manera muy clara y correcta, los requisitos para obtener inversión de poblaciones en uniones p-n. Sin embargo no plantearon la necesidad de la realimentación óptica con lo que no aparecía uno de los elementos más esenciales para conseguir el efecto láser. Este trabajo, según veremos más adelante, tuvo una importancia decisiva en uno de los grupos que obtuvieron los primeros láseres de semiconductor.

La condición a la que llegaron Bernard y Durauffourg para obtener la emisión láser era

$$F_c - F_v > h\nu$$

donde  $F_c$  y  $F_v$  son los cuasiniveles de Fermi de las bandas de conducción y de valencia, respectivamente, y  $\nu$  la frecuencia emisión. Esta condición se refiere únicamente a los fotones que son emitidos, no absorbidos.

Casi al mismo tiempo que los anteriores, Benoit a la Guillaume y Tric, de la Escuela Normal Superior francesa, publicaron también otro trabajo teórico sobre el láser de semiconductor<sup>8</sup>. En el mismo trabajo planteaban los tres posibles tipos de transiciones para obtener radiación láser en semiconductores. Estos eran: a) emisión estimulada, desde un estado excitado al estado fundamental, de un nivel de una impureza en un semiconductor de tipo indirecto, como por ejemplo de As en Ge, b) operación láser en un semiconductor degenerado con transición directa, como en InSb, y c) láseres relacionados con la aniquilación de excitones en semiconductores indirectos. Estas últimas transiciones dan lugar a la emisión de dos bosones: un fotón y fonón. Los casos posibles que consideran son, en este último tipo de transición, los del Si y del Ge. En su trabajo plantean ya la importancia del uso de una cavidad óptica para la selección de modos longitudinales y describen el uso de uniones p-i-n para la inyección de portadores, empleando las caras del propio semiconductor como espejos del resonador óptico.

<sup>6</sup> N.G. Basov, B.M. Vul y Yu. M. Popov, artículo no publicado pero registrado en el Comité de Descubrimientos e Inventos del Consejo de Ministros de la URSS, fechado el 7 de julio 1958. También en —, "Quantum mechanical semiconductor generators and amplifiers of electromagnetic oscillations", *Zh. Eksp. Theo. Fiz.*, vol. 37, pp. 587-588, 1959 (*Sov. Phys. JETP*, vol. 10, p. 416, 1959).

<sup>7</sup> M.G.A. Bernard y G. Durauffourg, "Laser conditions in semiconductors", *Phys. Stat. Sol.*, vol. 1, pp. 699-703, 1961.

<sup>8</sup> C. Benoit a la Guillaume y Mme. Tric, "Les semiconducteurs et leur utilisation possible dans les lasers", *J. de Physique*, vol. 22, pp. 834-836, 1961.



## 2.4.- ULTIMOS PASOS ANTES DE LA OBTENCIÓN DEL LÁSER DE SEMICONDUCTOR

Todos los artículos publicados hasta 1962, y que en su mayor parte eran de carácter teórico, eran válidos únicamente como indicación de las condiciones que deberían alcanzarse para observar emisión estimulada en un semiconductor. La mayoría de ellos trataban a los semiconductores indirectos y directos con un peso análogo lo que implicaba que consideraban que con ambos tipos la operación láser sería igualmente posible. Por otra parte, todos ellos tampoco ofrecían ningún tipo de análisis para identificar los cambios que deberían surgir en el dispositivo cuando apareciera la emisión estimulada. El resultado de todo era que no se tenía una idea clara de cuáles deberían ser los parámetros que, experimentalmente, deberían medirse para comprobar si se había alcanzado o no la emisión estimulada.

El principal hecho que tuvo lugar en 1962, y que contribuyó de forma significativa a la carrera por la obtención de efector láser en una unión p-n mediante inyección, fue la obtención de electroluminiscencia de alto rendimiento en uniones p-n de GaAs. La primera comunicación de un efecto de este tipo fue hecho a principios de 1962 por Sunner Mayburg y sus colaboradores, de los laboratorios de la GTE, en la reunión de marzo de la American Physical Society<sup>9</sup>. En el artículo que publicaron posteriormente<sup>9</sup>, y que no apareció hasta enero de 1963, ofrecen una eficiencia cuántica interna estimada próxima al 100 % para una unión p-n de GaAs. Su resultado indicaba que el camino emprendido era el correcto y que el uso de semiconductores de tipo directo era mucho más efectivo que el de indirectos. Pero dada la fecha de aparición de su artículo, en una fecha en la que ya los primeros láseres habían sido obtenidos, el resultado de su trabajo no obtuvo el reconocimiento que podría haber tenido si lo hubiera hecho en el momento de su presentación en la reunión indicada anteriormente.

No ocurrió lo mismo con unos resultados muy análogos, presentados poco después y que, por razón del foro en el que se expusieron, sí lograron una alta repercusión. Estos resultados equivalentes fueron presentados por R.J. Keyes y T.M. Quist por un lado, y por J. Pankove, por otro, en la Solid State Device Research Conference (SSDRC) de julio de 1962. Keyes y Quist, ambos del Laboratorio Lincoln, ofrecieron unos resultados, sobre diodos de AsGa, con eficiencia cuánticas internas de entre el 48 y el 85 % a una temperatura de 77 K<sup>10</sup>. Por su parte, los diodos de Pankove, de los laboratorios de la RCA, presentaban una eficiencia cuántica interna total estimada de entre 0,50 y 1,00 fotones/electrón, también a 77 K, aunque su eficiencia cuántica externa solo alcanzaba el 1 %. Además de este resultado, Pankove indicaba que sus diodos eran capaces de alcanzar una velocidad de modulación de

---

<sup>9</sup> J. Black, H. Lockwood y S. Mayburg, "High efficiency electroluminescence in GaAs", ponencia P14, presentada fuera de plazo ("*postdeadline paper*") presentada el 28 de marzo de 1962 por S. Mayburg en el 1962 "March Meeting of the American Physical Society, Baltimore, MD, Mar. 26-29, 1962 y no aparece en los resúmenes ofrecidos en *Bull. Amer. Phys. Soc.*, series II, vol 7, num. 3, mar. 26, 1962 como resultado de la conferencia. Los datos que se presentaron en esta reunión fueron, finalmente, publicados como "Recombination radiation in GaAs". Los datos que se presentaron en esta reunión fueron publicados posteriormente en *J. Appl. Phys.*, vol 34, pp.178-180, 1963.

<sup>10</sup> R.J. Keyes y T.M. Quist, ponencia presentada en la 1962 Solid State Dev. Res. Conf., Durham, NH (no publicada). Pueden verse los resultados en R.J. Keyes y T.M. Quist, "Recombination radiation emitted by gallium arsenide", *Proc. IRE*, vol. 50, pp. 1822-1823, 1962.

200 MHz<sup>11</sup>. Hay que señalar que Pankove había estado trabajando sobre el tema de la luminiscencia mediante inyección, en GaAs, desde 1961.

---

<sup>11</sup> J.I. Pankove y J.E. Berkeyheiser, ponencia presentada en la 1962 Solid State Dev. Res. Conf., Durham, NH (no publicada). Los resultados pueden verse en "A light source modulated at microwave frequencies", *Proc. IRE*, vol. 50, pp. 1976-1977, 1962

### 3.- EL PRIMER LÁSER DE SEMICONDUCTOR DE GENERAL ELECTRIC

#### 3.1.- ANTECEDENTES

Robert N. Hall fue el jefe del grupo de la General Electric, en Schenectady, que realizó uno de los tres láseres de semiconductor que fueron publicados en 1962. En una entrevista que se le hizo con motivo del veinticinco aniversario del nacimiento del láser<sup>1</sup> así como en un artículo previo<sup>2</sup>, antes del verano de 1962 le habían preguntado en varias ocasiones si creía factible la realización de un láser de semiconductor. Su



Robert Hall

respuesta en todas había sido negativa. Entre las múltiples razones que alegaba se encontraba la basada en los láseres que hasta entonces se habían desarrollado. Todos ellos requerían caminos ópticos relativamente largos y unos espejos con una reflectividad muy alta. Estos hechos parecían incompatibles con la fuerte absorción de los portadores libres, que es característica de los semiconductores. Por otra parte, la emisión estimulada se lograba siempre entre niveles muy finos, lo que daba lugar a emisiones muy monocromáticas, y los semiconductores, por el contrario, tendían a tener transiciones ópticas mucho más anchas, sobre todo cuando estas se realizaban entre las bandas de valencia y de conducción. Finalmente, y este era el factor más significativo, se encontraba el hecho de que las recombinaciones radiantes, en el caso de los

semiconductores, habían sido siempre altamente ineficientes; es éstos se daban muchos otros tipos de procesos no radiantes que impedirían que se alcanzase una radiación suficientemente intensa que diera lugar al laseado en el dispositivo.

Había, además de lo anterior, otro aspecto que estaba presente en los razonamientos que se hacían por aquellos días. Era el de determinar qué sentido y qué características podía tener el concepto de "inversión de poblaciones" en los semiconductores. Aunque en parte había sido aclarado teóricamente, como ya se ha visto antes, por M. Bernard, quedaba el cómo llevarlo a cabo. Hay que indicar que éste pasaba, todos los veranos, un cierto tiempo en los laboratorios de la General Electric.

Las dudas anteriores cambiaron de forma drástica en el verano de 1962, tras la SSDRC. Los dos artículos de Keyes y Quist y de Pankove, habían demostrado la posibilidad de conseguir unas eficiencias no conseguidas hasta entonces.

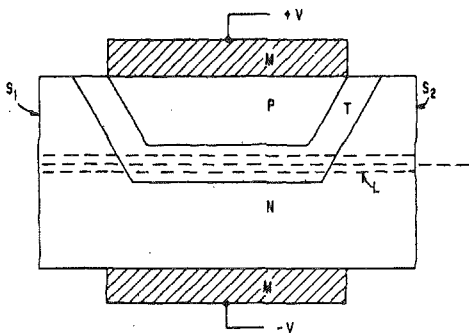
#### 3.2.- CAMINO HACIA EL LÁSER DE SEMICONDUCTOR

El análisis desarrollado por Bernard determinaba que era necesario aplicar una polarización directa a la unión lo suficientemente alta como para que los cuasi-niveles de Fermi de electrones y huecos estuvieran más separados que el valor de la banda

<sup>1</sup> "Laser Pioneer Interviews: Robert N. Hall". Realizada por Jeff Hecht el 11 de octubre de 1984. *Lasers & Applications*. Febrero, 1985. pp. 51-54.

<sup>2</sup> Robert N. Hall, "Injection lasers", *IEEE Trans. Elec. Dev.*, vol. ED-23, núm. 7, pp. 700-704, 1976.

prohibida del semiconductor. Esto solo podía conseguirse si los dos lados de la unión eran degenerados, esto es, estaban fuertemente dopados. En esas circunstancias, la región en la que tendría lugar la transición, que no era otra que la unión, no tendría una anchura superior a la de unas pocas longitudes de difusión. Dadas las concentraciones que parecían necesarias, su valor no sería superior a una micra. Este hecho conducía a que no pudiera tomarse como dirección del resonador óptico una que fuera perpendicular al plano de la unión, sino que fuera obligado el que la radiación generada y realimentada lo hiciera en dicho plano. Los espejos del Fabry-Perot deberían localizarse en las caras laterales perpendiculares al plano de la unión. Con esas ideas, el primer borrador del esquema que podría adoptar un posible láser



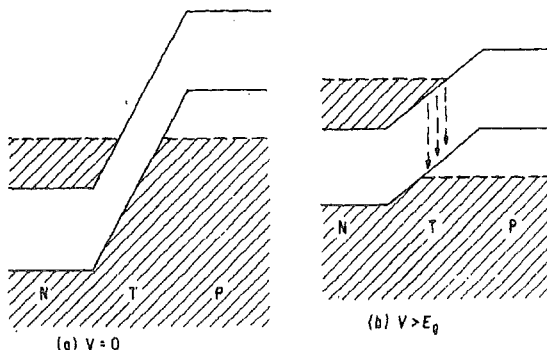
Initial thoughts about how to make a junction laser. We soon realized that it would be better to use a flat junction which would intersect the polished faces  $S_1$  and  $S_2$ .

de inyección, según las notas de Hall, es el que aparece en la Fig. . El perfil que presenta la unión, en principio, es típico de las realizadas por difusión de impurezas tipo p sobre un sustrato dopado tipo n. Como puede verse, una parte del posible trayecto de la luz, asumiendo que los espejos que configuran la cavidad se encuentran en las caras laterales, discurre a través de material tipo n y, consecuentemente, no por zona activa. Ello hizo que, de manera casi inmediata, se pensara en una unión plana que intersectara las caras pulidas  $S_1$  y  $S_2$ . Esta estructura es la que se mantuvo desde entonces.

General Electric no tenía, en ese momento, ningún interés concreto por la obtención de un láser de semiconductor. A pesar de ello, Hall comentó el tema con su inmediato superior, Roy Apker, y éste le admitió la posibilidad de que un pequeño grupo de cuatro o cinco, trabajaran a tiempo parcial en él durante unos meses. Aunque el proyecto no tuviera éxito, al menos se reproducirían algunas de las experiencias presentadas en la SSDRC y podrían ser válidas para algún desarrollo posterior.

Nada más empezar volvieron a brotar las dudas que Hall tenía antes del verano. La zona de la unión, en la que debía tener lugar el proceso, era muy estrecha y, aparentemente, incapaz de proporcionar la ganancia suficiente como para mantener una onda que tendría que penetrar a ambos lados de la unión, en zonas p y n, donde la absorción sería muy fuerte. Se ignoraba, asimismo, qué magnitud tendrían esas pérdidas y, al mismo tiempo, cuánto penetraría el campo generado en la unión en el espacio que la rodeaba. Finalmente tampoco se tenía idea de cuál podía ser la magnitud de la posible ganancia en dicha unión, ni cuántos electrones y huecos podrían inyectarse a la misma ni, como remate, cómo variaría su temperatura con el proceso que se esperaba tenía lugar.

En paralelo con todo lo anterior, otras consideraciones relacionadas con las propiedades ópticas surgieron inmediatamente. La mayor parte de ellas tenían relación con las características de la zona de unión de las bandas correspondientes a las dos zonas. De las experiencias previas con diodos túnel se sabía que en esa región aparecía una disminución significativa de la densidad de estados y de las probabilidades de transición óptica. Pero se ignoraba la importancia de su magnitud.



By applying a forward bias to a degenerate junction, the electron and hole populations can be made to overlap within the transition region without exceeding the threshold for injection across the junction. This produces a population inversion within the transition region T.

Al mismo tiempo, era también evidente que las propiedades ópticas del semiconductor a ambos lados de la unión deberían ser diferentes y ello podría dar lugar a una cierta curvatura en las trayectorias internas del campo generado: éste se curvaría hacia la zona con mayor índice de refracción. Mas se desconocía el orden de magnitud de la posible diferencia de índices. Si se hubiera conocido se podría haber intentado compensar este hecho haciendo que los espejos reflectores de los extremos de la trayectoria mantuvieran entre sí un pequeño ángulo en lugar de ser estrictamente paralelos. Pero no se conocía.

A pesar de todas las anteriores dudas, el equipo de Hall inició sus trabajos de manera inmediata, sin detenerse a realizar una estimación de los valores posibles de los datos mencionados. Se tenía la seguridad de que dos o tres grupos estarían trabajando, al mismo tiempo, con idénticos fines y el tiempo era un bien escaso.

Sobre obleas fuertemente dopadas de GaAs tipo n, se difundió Zn a diferentes temperaturas. Tras la difusión, se cortaron tiras de alrededor de medio milímetro de anchura, lo que parecía suficiente como longitud de camino óptico, y se cementaron sobre superficies que permitieran el pulido de las caras para configurar la cavidad. A continuación, estas tiras se volvieron a cortar en pequeños rectángulos y montados sobre soportes para su prueba. Ted Soltys fue el responsable de toda esta tarea, dada su experiencia previa en la realización de diodos túnel, cuya tecnología no era muy diferente.

La prueba de los diodos fue llevada a cabo por Gunther Fenner. La única idea que se tenía era que sería preciso refrigerarlos y hacer pasar por ellos tanta corriente como fuera posible sin llegar a quemarlos. Para ello construyó un generador de pulsos de corriente, capaz de suministrar intensidades de hasta 50 A, e introdujo los diodos en un dewar con nitrógeno líquido. Y a partir de ese momento surgió la que sería la

duda más significativa de todas: no se sabía qué parámetro medir para determinar si se estaba laseando o no. Era claro que debería aparecer algún cambio en la luminiscencia cuando surgiera la emisión estimulada. Pero el cambio, dados los valores de eficiencia que se habían presentado en la conferencia del verano, que estaban próximos al 100 %, no podrían ser muy significativos. Era, quizás, más posible que los cambios pudieran apreciarse mejor en las características corriente-voltaje de comportamiento del diodo. Midieron esa característica, pero no notaron ningún cambio aparente en sus primeras observaciones. La otra posibilidad estaba relacionada con las características ópticas de la radiación emitida. era seguro que debería aparecer un estrechamiento de la línea de emisión cuando la radiación fuera estimulada. Pero dado el corto tiempo que duraba el pulso de corriente no era posible realizar esta medida con los instrumentos de medida espectros disponibles en ese momento: todos ellos precisaban intervalos de tiempo para la medida mayores que los disponibles.

Otra posible medida era mediante observaciones del diagrama de radiación de campo lejano. Era también lógico que dicho diagrama cambiara de forma en el momento que se llegase a la emisión estimulada. A tal fin se colocó un tubo detector de imágenes en el infrarrojo a una cierta distancia del dewar. Con él se podría ver si había cambios en el diagrama si aumentaba la corriente. Pero los pulsos que actuaban sobre el láser eran de amplitud constante y solo había posibilidad de realizar la observación comparando el resultado de dos pulsos distintos de distintas amplitudes. Pero la medida tampoco resultó fácil. Los pulsos tenían una repetición de uno cada varios segundos y era casi imposible determinar visualmente si había diferencias de uno a otro. Una técnica más rudimentaria también fue probada. Consistía en depositar hielo sobre la cara del diodo e intentar ver si la imagen sobre el mismo había cambiado.

Con todo lo anterior, de una manera muy precipitada, se había logrado una infraestructura básica que solo necesitaba ponerse a obtener resultados.



One of the first diode lasers that Hall developed.

### 3.3.- PRIMEROS RESULTADOS

Después de dos meses de trabajo, en un domingo por la mañana, Gunther Fenner observó algunos resultados que indicaban que algo nuevo había surgido. Mientras la amplitud del pulso de excitación de diodo estaba por debajo de 6 A, la respuesta del fototubo era la misma independientemente de la forma de alcanzar dicha corriente. Si aumentaba la corriente, aumentaba la intensidad que registraba el fototubo, pero nada más. La señal registrada era una especie de imagen brillante con una forma no muy definida. Algo análogo ocurría hasta 12 A. Pero a partir de esa corriente aparecía una línea brillante, muy definida, que era imposible hubiera surgido como resultado de la emisión espontánea. El origen de la misma, como dice el propio Hall en su artículo, es todavía hoy un misterio para ellos, ya que no se corresponde en realidad con ninguno de los fenómenos que la radiación coherente de un láser de semiconductor debe proporcionar.

Al día siguiente, todo el equipo ya observando el fenómeno, se hizo la prueba con otros diodos. El resultado ya era consistente con lo que teoría del campo lejano determinaba: fuertes líneas de interferencia.

Solo quedaba ya obtener un conjunto más amplio de medidas y de observaciones que permitieran publicar, con garantía, lo que se había obtenido. Ello quería decir mejorar las medidas experimentales y, sobre todo, interpretar los resultados. Lo que, aunque obvio, no era en modo alguno fácil. El pulso de corriente era todavía lo suficientemente largo como para que, mientras se aplicaba, el diodo se calentase y el espectro pudiera sufrir un desplazamiento. Por otra parte, no se sabía cuáles eran los diodos válidos y cuáles los defectuosos. Y no se sabía porque tampoco se sabía cuáles eran los resultados que eran los correctos. En cualquier caso, se adoptaron aquellos que, de una manera en parte intuitiva y en parte lógica, proporcionaban medidas que se ajustaban más a los modelos o las teorías que se habían llegado a entender.

En paralelo con lo anterior, otro conjunto de documentos debían ser también generados. Eran los que se necesitaban para solicitar la patente de todo ello, ya que debería ser presentada antes de que el manuscrito fuera enviado para su publicación.

Un hecho no deseado incrementó el nivel de nerviosismo del grupo. Como todos los años, el Dr. Bernard había llegado a los laboratorios de la General Electric para pasar un cierto tiempo e intercambiar nuevas ideas. El Dr. Hall tuvo que reunirse varias veces con él para tratar temas relacionados con el posible láser de semiconductor, sin poder decirle nada de lo que habían obtenido. El secreto necesario en determinados momentos de un desarrollo impedía cualquier comentario. Hall dice en su artículo: *"How I wanted to take him into the adjoining room where I could show him a laser in operation!"*. El comentario parece un tanto difícil de aceptar.

El artículo con los resultados apareció en el número del 1 de noviembre de 1962 de *Physical Review Letters*<sup>3</sup>.

El dispositivo de Hall era un cubo de 0,4 mm de lado con la unión situada en el plano horizontal que pasaba por el centro. Las caras frontal y trasera se había pulido de manera que configurasen el necesario resonador de Fabry-Perot y eran perpendiculares al plano de la unión. La corriente pulsada estaba compuesta por pulsos de entre 5 y 20  $\mu$ s de duración, con el diodo polarizado en directa e inmerso en nitrógeno líquido. En esas condiciones, la corriente umbral para conseguir la radiación láser era de 8500 A/cm<sup>2</sup>. Por debajo del umbral, el espectro de radiación tenía una anchura de 125 Å que disminuía drásticamente a 15 Å a partir de dicho umbral.

---

<sup>3</sup> R.N. Hall, G.E. Fenner, J.O. Kingsley, T.J. Soltys y R.O. Carlson, "Coherent light emission from GaAs junctions", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 9, pp. 336-368, 1962.





## **4.- EL PRIMER LÁSER DE SEMICONDUCTOR DE IBM**

### **4.1.- ANTECEDENTES**

Como en otros entornos, gran parte de los investigadores trabajando en los laboratorios de IBM a principios de los años sesenta, no consideraban muy factible a corto plazo la realización de láseres de semiconductores. Los mismos problemas que habían sido vistos por R. N. Hall, in General Electric, eran compartidos por muchos otros. En esta ocasión, el único que consideró en serio el tema fue el director del Departamento de Semiconductores, Rolf Landauer, que encargó a Gordon Lasher que empezara a analizar el tema y los problemas que podían presentarse. Aunque no directamente relacionado con el campo principal de la actividad de IBM, podía ser posible que un dispositivo como el que se pretendía obtener tuviera a la larga alguna repercusión en el campo de los ordenadores. Lasher, junto con Bill Dumke, llegaron a la conclusión de que los principales problemas se encontrarían en la pérdidas por difracción y en la absorción por portadores libres. En el verano de 1961, y basándose en los cálculos que se habían hecho hasta entonces, Rolf Landauer y Robert Keyes iniciaron una serie de conversaciones con representantes de los U.S. Army Electronics Research and Development Laboratories, de Fort Monmouth, N.J., sobre la posibilidad de cooperar en la realización de un láser de inyección. Poco después, IBM envió un posible contrato para trabajar en el tema. El objetivo era desarrollar un láser de ese tipo en el plazo de una año con la financiación del Ejército. En dicho proyecto no iba a trabajar Marshall L. Nathan, que luego sería el jefe del grupo que lo desarrolló. Según indica el propio Nathan, consideraba él en ese momento lo más importante tener libertad para enfrentarse a aquellos problemas científicos que estimara oportuno que verse obligado a trabajar en ideas de otros. *"To be constrained by being required to work on a contract that someone else had written would have been intolerable"*, añade en el artículo en el que comenta sus impresiones sobre el primer láser de semiconductor.<sup>1</sup> En aquel momento, el único empuje para trabajar en este tema provenía de Rolf Landauer.



### **4.2.- INICIO DE ACTIVIDADES**

La situación de los laboratorios de IBM en Yorktown estaba en esos días muy polarizada hacia gran parte de los temas que constituían los avances más recientes en el campo de la tecnología, principalmente de semiconductores y láser. En concreto, Peter Sorokin había dado un fuerte impulso al láser con el desarrollo de uno de  $\text{CaF}_2$  y, por otro lado, el GaAs estaba siendo muy estudiado como material para la fabricación de transistores de alta velocidad. Un gran número de investigadores centraban sus esfuerzos en ambos campos. Por ello, hablar de láser y hablar de GaAs era algo común a todos. M.I. Nathan participaba en la realización de medidas espectroscópicas en GaAs y otros cristales aislantes y parece que solo hablaba del láser de semiconductor en conversaciones informales, fuera de su trabajo y como curiosidad.

En enero de 1962, Landauer invitó a Sumner Mayburg, compañero suyo de estudios en Harvard, para dar una charla sobre electroluminiscencia en uniones p-n de GaAs. Mayburg había observado que la mayor parte de la luminiscencia se centraba

---

<sup>1</sup> Marshall I. Nathan, "Invention of the Injection Laser at IBM", *IEEE J. Q.E.*, vol. QE-23, pp.679-683. 1987.

en una línea, bastante fina, situada cerca de la energía de la banda prohibida. Afirmaba que dicha luminiscencia tenía una eficiencia cuántica próxima a la unidad. Pero la evidencia que ofrecía de ello era muy débil. Había observado que la luz emitida era lineal con la corriente tras haber sido superlineal a bajas corrientes. Mayburg decía que aquello era debido a que el proceso no radiante se había saturado. Decía también que a 77 K era posible ver el diodo a pesar de que radiaba a 8400 Å. Estos resultados los presentó también en el American Physical Society Meeting, en Marzo del 62, en Baltimore, pero no fueron muy bien recibidos. Pero el tema excitó la curiosidad de Nathan que decidió acercarse a él, aunque de manera colateral.

Y para iniciarse en el tema se acercó a Peter Sorokin. Como comenta Nathan en su artículo, ni él sabía nada de láseres ni Sorokin sabía nada de semiconductores. La conversación entre ambos no parece fue especialmente fácil. A la única conclusión que llegaron sin dificultad era que deberían emplear, de la mejor manera posible, el instrumental de que disponía Sorokin y que era casi el único con el que contaban. En realidad, la única instrumentación válida era un dewar de helio y una lámpara de flash de pulsos con tiempos de subida de un milisegundo. En lo que se refería a semiconductores, habían conseguido un trozo paralelepípedo de GaAs, de alta pureza, que medía  $2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ cm}^3$ , que pulieron y atacaron ligeramente para eliminar las imperfecciones superficiales. Estas dimensiones eran comparables a las que había usado Sorokin para su láser de  $\text{CaF}_2$  y que si en aquel caso eran adecuadas, aquí eran demasiado grandes, dada la mayor ganancia que se intuía debería tener el GaAs. El problema era que nadie allí sabía como cortar y trabajar sobre tamaños tan pequeños como los requeridos. Las primeras experiencias realizadas sobre el cristal entero no dieron ninguna información. El objetivo a medir era, simplemente, la luminiscencia del GaAs, que tras ser iluminado con el flash, podía verse que se desplazaba hacia mayores longitudes de onda y finalmente se extinguía, en el intervalo de duración del pulso de luz. Ello se debía al calentamiento inducido por la luz de la excitación. La consecuencia de todo ello era que las constantes de tiempo de los instrumentos de medida eran muy grandes en relación con las magnitudes que se necesitaba medir. Este mismo problema era común entonces a muchos otros laboratorios.

Llegó junio de 1962 y tuvo lugar la SSDRC, pero nadie de IBM en Yorktown asistió a la misma. Ello da idea del escaso grado de sofisticación que tenían sus trabajos en semiconductores en ese momento. El laboratorio era nuevo y el nivel no muy alto. Al día siguiente de la conferencia, el *New York Times* daba noticia de los resultados de Keyes y Quist. Rolf Landauer llevó un ejemplar del periódico a la reunión del grupo de semiconductores, informándose así todos del hecho por un cauce no demasiado científico. A partir de aquel momento, todos los recursos, que los esfuerzos que Landauer no había conseguido hasta entonces movilizar al servicio de los láseres de inyección, se pusieron en marcha.

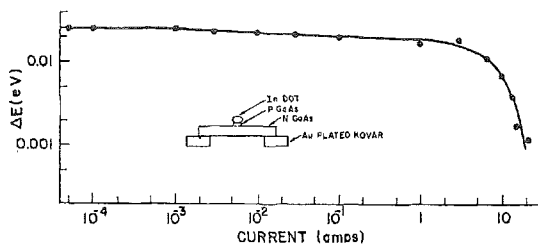
Dick Rutz, que hasta entonces había estado trabajando en diodos túnel recibió el encargo de fabricar las uniones p-n. John Marinace se dedicó a preparar las obleas y las difusiones de Zn. Rick Dill y Dick Ritz prepararían los diodos montándolos sobre los necesarios soportes de refrigeración. Nathan, por su parte, se dedicaría a las medidas. Al final de todo ello, los resultados dieron únicamente una eficiencia, medida con una termopila, del orden del 10 %, muy alejada de los resultados dados en la conferencia de junio. Landauer no tiró la toalla y siguió forzando a todos a seguir en sus tareas a la mayor velocidad posible. Se sabía que había muchos otros grupos trabajando en el mismo tema, en los Lincoln Labs, en RCA, en Sylvania, y todos ellos querían llegar los primeros.

### 4.3.- PRIMEROS RESULTADOS Y PUBLICACIONES

El principal problema al que se enfrentaban era que ninguno sabía cómo realizar un verdadero láser de inyección, sobre todo en lo que se refería a la necesaria cavidad. Como no tenían tiempo para solucionarlo, trataron de soslayarlo trabajando por otro camino. Si el objetivo fundamental era el de obtener, únicamente, radiación estimulada, era posible que ésta se alcanzase sin necesidad de cavidad. Y una forma de observarla podía ser si, a partir de una cierta corriente umbral, hubiera un incremento en la intensidad de luz emitida y una mejora en su direccionalidad. Las medidas realizadas en esa dirección no condujeron a ningún resultado. La eficiencia cuántica no variaba entre 4,2 y 77 K y la luz era absolutamente lineal con la corriente hasta valores de  $10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Nadie parece que se sorprendió, porque si hubiera resultado algo positivo habría sido demasiado sencillo y, como dice Nathan, *"nothing could be that easy"*.

Ante la duda de si la suposición era correcta, Bill Dumke pasó a intentar la realización de algunos cálculos teóricos. Al cabo de unos días, ya concluidos, se los presentó a Nathan. Había llegado a la conclusión de que los modos electromagnéticos que podrían aparecer en la línea de emisión estimulada deberían estar altamente excitados dadas las altas densidades de corriente, la alta eficiencia interna y las múltiples reflexiones internas existentes. Creía que la observación de emisión estimulada sin cavidad externa era factible. Si la ganancia era lo suficientemente alta, podría ser observada. Pero tras el análisis de estos cálculos, llegaron a la conclusión de que las observaciones experimentales que habían estado haciendo no habían ido en la dirección adecuada. No era la intensidad de la luz emitida la magnitud a medir. Dumke sugirió que, quizás, el parámetro adecuado sería el estrechamiento espectral de la línea. Esa era una característica general en todo proceso de láseado y debería ser mucho más sensible que cualquier otra medida. Y emprendieron ese camino.

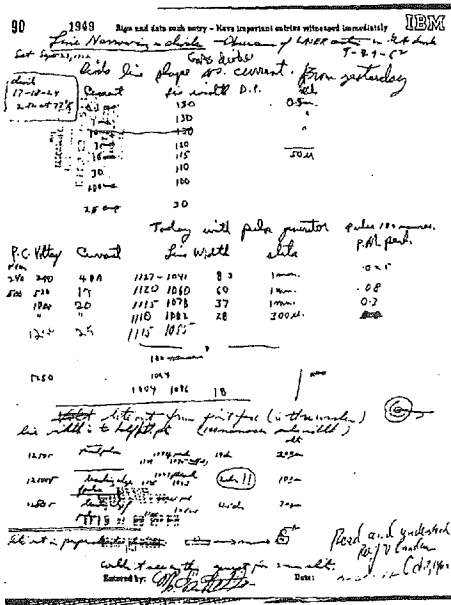
Enfrentaron el diodo al espectrómetro, excitando a aquel con una fuente de corriente constituida por un viejo generador de pulsos de una lámpara de mercurio que había sido empleada en experimentos de electrones calientes. La longitud del pulso era de alrededor de medio microsegundo. Según aumentaba la corriente, la



Spectral linewidth versus current from a GaAs p-n junction at 77 K. Junction area was  $1 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>.

línea de electroluminiscencia comenzaba a desplazarse hacia longitudes de onda más altas, debido al calentamiento del diodo. Para reducir el efecto la única forma de hacerlo era disminuir la longitud del pulso. En torno a  $3 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>, surgió un ligero estrechamiento del espectro de la línea de emisión: pasó de 120 Å a 90 Å. Según algunos cálculos, la línea debería haber iniciado su disminución a  $3/2$  kT, esto es, 56 Å, a 77 K, si no hubiera colas en las bandas. La estima más adecuada era que la línea debería tener del orden de kT, o sea, 38 Å. Y el resultado fue que, al aumentar aun

más la corriente, la anchura de la línea disminuyó a 30 Å. esta medidas pueden verse en la Fig. . En la Fig. aparecen también las notas apuntadas por Nathan en su cuaderno de trabajo que, como puede verse, no son un ejemplo de orden y claridad.



Page from notebook showing data for spectral line narrowing.

Nathan enseñó sus resultados a Dumke. A pesar de lo avanzado de la hora, las 6 de la tarde de un viernes, se atrevieron a llamar a Landauer a su casa y se lo comunicaron.

Durante todo el fin de semana, Natahn y Gerry Burns estuvieron en el laboratorio repitiendo las medidas e intentado ver cuál podía ser el mínimo en la anchura de línea que se obtenía. Lo comprobaron en diferentes diodos, pero en ninguno se rebajaron los 30 Å del inicial. De hecho, en éste sí observaron una cierta disminución e, incluso, como si la línea observada fuera el resultado de la superposición de dos o más líneas que no podían separarse dada la resolución del espectrómetro usado: unos 2 Å.

Escribieron estos resultados lo más rápido que pudieron y los enviaron a *Applied Physics Letters*<sup>2</sup> sin atreverse a hacerlo a *Physical Review Letters* por los más complejos métodos de evaluación que tenía esta última.

Nada más enviado el artículo, surgieron un torrente de dudas. Se había mostrado que el GaAs era un posible material láser, pero no se le había hecho lásear y, mucho menos, se habían obtenido las propiedades que le caracterizan. Ni emitía una radiación colimada ni se sabía si era coherente. Y lo que era aun peor, no se tenía ni idea de cómo conseguirlo. La competición con otros laboratorios no parecía

<sup>2</sup> M.I. Nathan, W.P. Dumke, G. Burns, F.H. Dill Jr y G. Lasher, "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions", *Appl. Phys. Lett.*, vol 1, pp. 62-64, 1962.

encontrarse en una situación muy favorable. Los resultados obtenidos, aunque no inmediatos, sí habían sido conseguidos de una forma bastante fácil. Si se pretendía mejorarlos, habría sido necesario que más personas se hubieran dedicado a hacer medidas. Y para ese tema solo estaban Burns y Nathan. La opinión de este último en el tema era que la dirección de los laboratorios había sido demasiado conservadora. El tiempo de trabajo no había superado al mes y en este corto espacio de tiempo deberían haberse puesto todos los medios necesarios para avanzar lo más posible. Ante esa situación, Nathan, sin contar con sus jefes inició contactos con otros investigadores de su laboratorio para que, de forma totalmente personal y desinteresada, invirtieran una parte de su tiempo en el tema. Con ello, quizás, podría avanzarse a niveles realmente competitivos con otro grupos.

El laboratorio de semiconductores de IBM era, en ese momento, relativamente pequeño y todos sus miembros conocían bastante bien lo que hacían los demás. Por ello Nathan pudo dirigirse específicamente a cada uno pidiendo de él aquello en lo que podía contribuir en algo. Su esfuerzo tuvo recompensa. Al poco, varios investigadores dirigían parte de sus esfuerzos a mejorar los resultados obtenidos por Nathan. Alan Fowler emprendió la tarea de mejorar el acoplo óptico de los láseres y, en paralelo, realizó el primer trabajo en puertas lógicas<sup>3</sup> (este tema estaba muy directamente relacionado con las líneas de IBM). Otros, como W. Howard y F. Fang, iniciaron medidas de la variación del espectro con la temperatura. R. Laff midió la imagen de difracción de campo lejano. La organización no era muy envidiable. En cierta manera tenía algo de caótica, pero era mejor que no hacer nada. Los ejecutivos de los laboratorios iniciaron un movimiento para cortar aquello. Nathan consiguió convencerles de que solamente sería por un plazo de uno o a lo sumo dos meses. Muy poco después, Rick Dill y Dick Rutz consiguieron una técnica para tallar el GaAs y así obtener una cavidad óptica<sup>4</sup>, a partir de este momento, pudieron ya trabajar con láseres reales viendo en ellos los efectos que, teóricamente, habían predicho: modos, efectos direccionales. El único problema que tenían con los láseres que fabricaban, y que era un problema que jamás habían considerado ni, de hecho, lo habían considerado como tal, era que tallaban las cuatro caras del paralelepípedo, perpendiculares al plano de la unión. Tuvieron que aparecer los resultados de General Electric, en su artículo de *Phys. Rev. Lett.* para que empezaran a dejar dos de ellas rugosas.

Durante el mes de octubre, Howard y Fang llegaron ya a observar al láser trabajando en onda continua<sup>5</sup>, aunque solo a 2 K. Michel y Walker observaron directamente la luz que provenía de la zona tipo p de la unión así como la imagen del modo de campo cercano<sup>6</sup>. Poco después, Burns y Nathan consiguieron que el láser trabajara a temperatura ambiente, aunque no de forma continua sino pulsada<sup>7</sup>. Finalmente, Lasher y Dumke llegaron a calcular la condición umbral para el láseado<sup>8</sup>.

Una historia, previa a la publicación del artículo de *Appl. Phys. Lett.*, merece aparecer aquí. El artículo estaba previsto se publicara el día 1 de noviembre de ese

<sup>3</sup> A.B. Fowler, "Quenching of gallium arsenide injection laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 3, pp. 1-3, 1963.

<sup>4</sup> F.H. Dill Jr y R.F. Rutz, "Method of fabrication of crystalline shapes". U.S. patent 3247576, presentada el 30 de octubre de 1962 y concedida el 26 de abril de 1966.

<sup>5</sup> W.E. Howard, F.F. Fang, F.H. Dill Jr y M.I. Nathan, "CW operation of a GaAs injection laser", *IBM J.Res.Develop.*, vol. 7, pp. 74-75, 1962.

<sup>6</sup> A.E. Michel, E.J. Walker y M.I. Nathan, "Determination of the active region in light emitting diodes", *IBM J.Res.Develop.*, vol. 7, pp. 70-71, 1962.

<sup>7</sup> G. Burns y M.I. Nathan, "Room temperature stimulated emission", *IBM J.Res.Develop.*, vol. 7, pp. 68-69, 1962.

<sup>8</sup> G.J. Lasher, "Threshold relations and diffraction loss for injection lasers", *IBM J.Res.Develop.*, vol. 7, pp. 58-61, 1963.

año. Pero un poco antes tenía lugar en Washington el International Electro Device Meeting. En él aparecía en el programa que el grupo de los Laboratorios Lincoln, uno de los que presumiblemente trabajaban en el tema, iba a presentar una ponencia. Aunque el título o aparentaba nada relacionado con él, todos en IBM pensaron que presentarían algún resultado espectacular. En previsión de ello, remitieron a Comité del Programa de la reunión un artículo fuera de plazo sobre la localización de la región activa en LEDs de GaAs. Nathan viajó a Washington con dos posibles artículos en su cartera. Uno era el que habían enviado. El otro, uno diferente en el que se ofrecían sus resultados relacionados con la emisión estimulada. Fue una falsa alarma. El grupo de los Lincoln no ofreció nada relacionado con el láser de semiconductor y Nathan, que hablaba después, pudo presentar el artículo primero y con ello, todo quedaba a expensas de la publicación en la revista. Pero la historia, a pesar de ello, no quedó en calma. Unos días antes del 1 de noviembre, Nathan recibió para evaluar, también en *Appl. Phys. Lett.*, un artículo de los Lincoln Labs. En él se presentaba su láser de GaAs, hecho que el grupo de IBM, como se ha visto, no había alcanzado en el artículo que estaba a punto de ser publicado, aunque su caracterización estaba ligeramente por detrás de las medidas hechas por Nathan y su equipo. Casi al mismo tiempo tuvieron también noticias de que, el 30 de octubre, Hall y su equipo publicarían en *Phys. Rev. Lett.* otro trabajo sobre láser de semiconductor. La decepción y el desánimo circuló por todos los que habían trabajado en IBM. Para evitar que lo que publicasen a partir de entonces pudiera parecer que era simplemente seguir los pasos de lo que habían hecho en general Electric, enviaron para su rápida publicación, al *IBM Journal of Research and Development*, todo lo que habían hecho hasta ese momento. Son las referencias comentadas anteriormente <sup>6-9</sup>. La ilusión de ser los primeros había muerto.

## **5.- EL PRIMER LÁSER DE INYECCION DE LOS LABORATORIOS LINCOLN**

### **5.1.- ANTECEDENTES**

Durante los primeros años de la década de los cincuenta, el principal énfasis de la mayor parte de los laboratorios que desarrollaban sus trabajos de investigación en temas de semiconductores se centraba en el paso del germanio al silicio. Aquél había determinado el inicio de los primeros dispositivos semiconductores, pero el silicio había probado ser un candidato más firme para el desarrollo de las próximas generaciones. El hecho de la gran cantidad de grupos trabajando en este área determinó que Robert E. Rediker, de los Laboratorios Lincoln, del MIT, con la autorización de sus supervisores, iniciara un camino separado de esa gran corriente de los otros laboratorios. Dado el alto número de investigadores trabajando en silicio, parecía más factible realizar alguna contribución significativa, si se tomaba un semiconductor diferente como objeto de estudio. El que, con toda certeza, poseía unas características favorable para trabajar en él era el GaAs, dado que, debido a su mayor movilidad y a la menor corriente de pérdidas derivada de su mayor anchura de la banda prohibida que presentaba, podría dar lugar a dispositivos con una velocidad de trabajo mucho mayor que el silicio. El mayor experto en aquel momento en GaAs era el profesor Welker, de Siemens, en Erlangen (RFA), con el que Rediker se entrevistó para manifestarle sus ideas. El prof. Welker confirmó su suposición y, como consecuencia, todo el grupo de semiconductores de los Lincoln decidió pasar a este semiconductor como objetivo central de sus trabajos. Con material cedido por los laboratorios de la RCA, desarrollaron algunos sencillos diodos que, en una primera observación, daban ya unos tiempos de conmutación de 3 ns. Rediker comenta en su recuerdos de aquel tiempo que el mayor problema lo tuvieron, no con la fabricación del dispositivos, sino con la medida de sus características. Dice que para obtener el resultado de los 3 ns anteriores, necesitaron estar dos días enteros sincronizando el barrido del osciloscopio del que disponían y que era el más sofisticado disponible en aquel momento. En mayo de 1959 pudieron presentar, públicamente, sus resultados<sup>1</sup>. Estos diodos habían sido realizados por difusión de Zn en GaAs. A mediados de 1960, Ted Quist se unió al grupo y entre las variaciones tecnológicas que se iniciaron estaba la de desarrollar diodos de aleación en lugar de difundidos. Los primeros resultados indicaban que las propiedades eléctricas de ambos tipos diferían significativamente. Debido a ello, Quist pasó a analizar, como técnica de caracterización, su radiación por recombinación.



Y para hacerlo se puso en contacto con Bob Keyes, que estaba empleando en aquel momento un espectrómetro de prisma, para que midiera la luminiscencia. La luz originada por el diodo difundido que incidió sobre el instrumento hizo que, para poder medirla, tuviera Keyes que aumentar 3 órdenes de magnitud la escala superior del registrador así como cerrar las rendijas del espectrómetro casi hasta cero. Calculada la eficiencia de esta radiación, que se producía entre los puntos más próximos de las bandas, dio un primer resultado de casi el 125 %. Determinada con más cuidado, el

---

<sup>1</sup> J. Lowen y R.H. Rediker, "Gallium arsenide diffused diodes", ponencia presentada en Electrochem. Soc. Meeting, Philadelphia, PA, mayo 1959.

resultado obtenido era del 100 %. Cuando fueron presentado en público<sup>2</sup>, para poder manejar un cierto margen de seguridad, el resultado presentado fue del 85 %. A pesar de ello, uno de los asistentes a la reunión.

Hank Sumers, comentó en voz alta que aquello violaba la segunda ley de la Termodinámica. Keyes le respondió, con un cierto sentido del humor, que lo sentía mucho. También entre los asistentes estaba Bob Hall. Con unas pocas frases demostró por qué no se violaba ninguna ley.

Con los anteriores resultados parecía ya seguro que podría desarrollarse un láser de semiconductor a corto plazo.

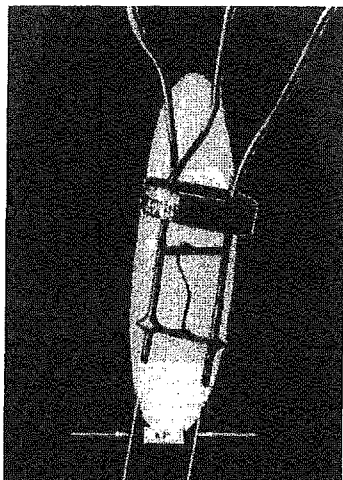
## 5.2.- PRIMERAS IDEAS Y PRIMEROS RESULTADOS

En los laboratorios Lincoln trabajaba también, en aquel momento, Herb Zeiger, físico teórico, que había sido alumno de Charles Townes y con el que publicó el primer artículo del máser. Él, conjuntamente con Bill Krag, había considerado los posibles máseres de semiconductor en tres categorías:

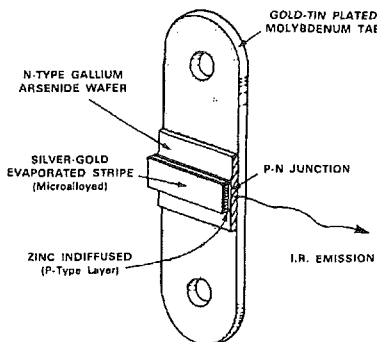
- 1) aquellos que tenían sus estados iniciales y finales en la misma banda,
- 2) los que tenían sus estados iniciales y finales en diferentes bandas pero que estaban separadas por una región prohibida directa, y
- 3) los que eran análogos a los del caso anterior, pero eran de banda indirecta.

En el mismo informe se daba una expresión general para la ganancia por unidad de longitud debida la inversión de poblaciones. Esta expresión mostraba una integral extendida a la distribución de estados ocupados y no ocupados, similar a la que se empleó después<sup>3</sup>.

El trabajo anterior no puede considerarse, en modo alguno, el resultado de una iniciativa aislada. De hecho, durante la década de los cincuenta, varios programas de los Lincoln intentaron aunar los conceptos de semiconductores y máser. Zeiger, Ben Lax, Alan McWhorter, Stan Autler y Bill Krag, plantearon un gran



A photograph of our first diode laser. The laser is mounted on the thin wire and the bottom of the photograph. A thin wire is used to hold the laser in place with its thin leads going to the top of the photograph. The tab and the n-side of the p-n junction are connected to two of the leads. A wire goes from the side to the other lead.



<sup>2</sup> R.J. Keyes y T.M. Quist, "Recombination radiation emitted by gallium arsenide diodes", ponencia presentada en Solid State Device Res. Conf., Durham, NH, julio 1962.

<sup>3</sup> H.J. Zeiger y W.E. Krag, "Semiconductor infrared meser studies". Quarterly Progress Rep. on Solid State Research, Lincoln Laboratory, M.I.T., Octubre 1959, pp. 41-43, AD 231991.

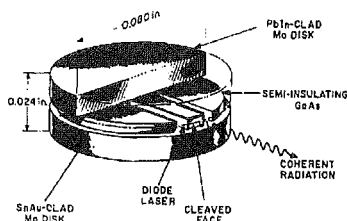


número de esquemas posibles en los que se consideraba tanto el bombeo eléctrico como el óptico. El terreno estaba pues abonado para continuar por él.

Cuando Zeiger vio los resultados de luminiscencia obtenidos no tuvo ninguna duda de que el dispositivo podía llegar a lasear. Para ello determinó la geometría que consideraba la más idónea para ello e indicó que se fabricasen así los diodos. Deberían ser paralelepípedos rectangulares y en él las caras más pequeñas, que serían perpendiculares al plano de la unión que es donde tendría lugar el efecto láser, pulidas actuando así como espejos del resonador.

El principal problema, al igual que en otros laboratorios, era el de cómo realizar un paralelepípedo tan pequeño, con dos caras absolutamente paralelas y pulidas espectacularmente. Este hecho no es ahora un problema pero sí lo era en 1982. Todos los experimentalistas recorrieron las diferentes compañías que trabajaban sobre cristales. Ninguna de todas ellas había trabajado en GaAs. No hubo así más remedio que intentar realizar todo el trabajo en los propios laboratorios, sin ayuda externa., tanto el cortado como el pulido. Quist en una ocasión comentó que no habían tenido suerte, porque si la muestra se hubiera caído al suelo a lo mejor se habría roto y así habrían visto que el mejor método para obtener las caras paralelas era por tallado y no por corte.

A la hora de determinar si el dispositivo laseaba o no, la técnica que adoptaron fue la de diferenciar las características ópticas de la superradiancia, previa al umbral, de las del laseado. Para ello no fue suficiente con el espectrómetro de prisma que habían usado antes, y tuvieron que pasar a otro de red de difracción que estaba siendo usado por Krag.



GaAs diode laser in the pill package used in 1963. The diode laser is a rectangular parallelepiped whose dimensions were typically 0.03 cm X 0.08 cm X 0.008 cm thick.

En ese momento, dado el enfoque eminentemente práctico que tenían sus desarrollos, todo el grupo pensó que había que encontrar una aplicación inmediata al posible láser, cuando se obtuviese. De manera inmediata se pensó que esa aplicación tenía que ser en comunicaciones. Y para probar las posibilidades se consideraron los diodos emisores de luz que habían obtenido Keyes y Quist. El primero calculó el margen y el ancho de banda que podría enviar y Rediker obtuvo el permiso oficial, de la emisora de PBS, para enviar una señal de 350 THz. Este permiso venía impuesto por la normas de la FCC en ese momento. Muy pronto se consiguió realizar una transmisión de TV, a una distancia de 84 metros por encima de los tejados de los Laboratorios Lincoln<sup>4</sup> y casi inmediatamente otra a 50 km. desde la cima del monte Wachusett al tejado de los Lincoln<sup>5</sup>. Ambos resultados fueron lo suficientemente espectaculares como para que la revista *Time* dedicara un amplio artículo a los mismos<sup>6</sup>. El último párrafo que podía leerse en él era: "*If the world is ever afflicted with a choice between thousands of different TV programs, a few diodes with their feeble*

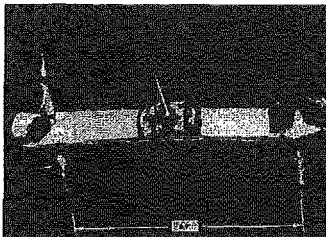
<sup>4</sup> R.H. Rediker, R.J. Keyes, T.M. Quist, M.J. Hudson, C.R. Grant y R.G. Burgess, "Gallium arsenide diode sends television by infrared beams", *Electron.*, vol. 35, pp. 44-45, Oct. 5, 1962.

<sup>5</sup> R.J. Keyes, T.M. Quist, R.H. Rediker, M.J. Hudson, C.R. Grant y R.G. Burgess, "Nodulated infrared diode spans 30 miles", *Electron.*, vol. 36, pp. 38-39, abril 5, 1963.

<sup>6</sup> "Snoopscope television", *Time*, p.75, abril 19, 1963.

*beams of infrared light might carry them all at once*". Rediker había advertido previamente a Lax sobre los peligros de que parte del grupo de los Lincoln se dedicase a ese tema, que era más espectáculo que objetivo científico, en lugar de centrarse claramente en el desarrollo del láser de semiconductor. Parece que no se tuvo demasiado en cuenta la advertencia. La urgencia del tema parecía menor de lo que en realidad era. Los otros grupos que buscaban un láser de inyección estaban avanzando más rápidamente de lo que el grupo del M.I.T. creía.

En septiembre, la estructura requerida del láser estaba concluida. A principios de octubre, un viernes por la tarde, Quist vio, mediante un visor de infrarrojo, lo que



parecía ser un largo filamento luminoso con una estructura similar a la que debería tener un haz láser. Lax señaló que, dado el resultado todo el grupo debería cancelar sus proyectos de fin de semana para trabajar sobre el resultado obtenido. Rediker y Quist dedicaron todo el sábado a demostrar que se había alcanzado la meta propuesta: que el diodo era una láser y que emitía radiación coherente. El área del diodo era de  $1,4 \times 0,6 \text{ mm}^2$  y su corriente umbral, a 77 K era de aproximadamente  $10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  disminuyendo

en un factor de 15 si la temperatura se reducía a 4,2 K. Se preparó inmediatamente un artículo, que luego se dividió en dos, uno experimental<sup>7</sup> y otro teórico<sup>8</sup>, enviándose el 23 de octubre para su publicación. En la Fig. puede verse una fotografía del láser empleado para tomar los datos del primer sábado de octubre de 1962.

Como ocurrió con los otros grupos, a finales de octubre, en el 1962 International Electron Device Meeting la única preocupación era saber si alguno de los competidores presentaría resultados sobre sus experiencias en este terreno. Terminó la reunión y ninguno hizo público ningún detalle sobre el tema.

<sup>7</sup> T.M. Quist, R.H. Rediker, R.J. Keyes, W.E. Krag, B. Lax, A.L. McWhorter y H.J. Zeiger, "Semiconductor maser of GaAs", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, pp. 91-92, Dic. 1962.

<sup>8</sup> A.L. McWhorter, H.J. Zeiger y B. Lax, "Theory of semiconductor maser of GaAs", *J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 235-236, Enero 1963.

## **6.- EL SEGUNDO LÁSER DE SEMICONDUCTOR DE GENERAL ELECTRIC: PRIMER LÁSER CON EMISIÓN EN EL VISIBLE**

### **6.1.- ANTECEDENTES**

General Electric no solo impulsaba el estudio de materiales semiconductores y su aplicación en dispositivos en sus laboratorios de Schenectady, NY, donde trabajaba Robert Hall, sino que también en Syracuse, NY, mantenía una actividad equiparable. Allí, desde 1957 se encontraba Nick Holonyak que, en la Universidad de Illinois, en 1954, había concluido su Tesis Doctoral, bajo la dirección de John Bardeen en temas relacionados con el germanio, principal protagonista, en esos días, de la investigación en dispositivos semiconductores. En 1954 se había incorporado a los Laboratorios de la Bell Telephone para trabajar con John Moll que le había inducido a cambiar al silicio



en el que, según la opinión de este último, había muchas más posibilidades en temas como conmutadores pnpn y transistores para conmutación que en el germanio y en donde se familiarizó con tecnologías que estaban iniciándose en ese momento, como las de difusión de impurezas, fotolitografía y metalización, y que luego serían las básicas en Microelectrónica. Formando parte ya del grupo de General Electric en Syracuse, continuó su trabajo en el silicio siempre con la idea de que éste sería el candidato idóneo en temas en los que la conmutación y la resistencia negativa del dispositivo fuera la parte central de las propiedades deseadas. El diodo túnel, tras los trabajos de Leo

Esaki, era el principal eje de toda la actividad en ese terreno. Pero pronto apareció un factor que hizo variar la línea seguida por Holonyak: el Ge y el Si presentaban unas limitaciones en voltaje que obligaban a buscar otros materiales que no las tuvieran. Los compuestos III-V parecían los más adecuados y en ellos se centró parte de la actividad del laboratorio desde 1959.

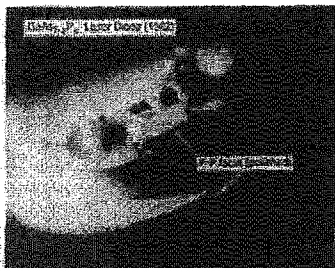
En el IRE Solid State Device Research Conference (SSDRC) de 1960, celebrada en Pittsburgh, PA, John Marinace presentó lo que quizás fue la primera heterounión de alta calidad fabricada en el mundo. Había sido crecida por epitaxia de Ge sobre GaAs. Holonyak, de vuelta ya en su laboratorio, pensó que él podía hacer lo mismo pero al revés, esto es, crecer GaAs sobre Ge. En octubre y diciembre de ese año, en los informes a dos contratos con la Air Force que tenía General Electric, indicó el crecimiento, por epitaxia en fase vapor (VPE), de GaAs sobre Ge, de GaAs sobre GaAs, de GaP sobre GaP y de GaP sobre GaAs, así como finalmente, de  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  sobre  $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ . La importancia de estos crecimientos serían de vital importancia para el desarrollo posterior de los láseres de semiconductor. En ese momento, el único objetivo era el de la realización de diodos túnel que pudieran soportar más altas tensiones sin rotura.

Desde la SSDRC de 1960 a la de 1962, los laboratorios de Syracuse de la General Electric continuaron en su actividad de realización de epitaxias para la fabricación de dispositivos electrónicos de semiconductores. Entre ellos se inició, también la de algunos emisores de luz por uniones p-n aunque como actividad muy de segunda fila. En la SSDRC de julio de 1962, que se celebraba en Durham, NH, ninguno de los artículos que presentaba este grupo tenía que ver con temas de luminiscencia. Como ya se ha comentado en anteriores ocasiones, de esa conferencia, una ponencia sobresalió por encima de todas las demás, era la ya conocida presentada por Keyes y Quist, del grupo de Rediker en los Laboratorios Lincoln. Holonyak quedó impresionado, además de por la alta eficiencia que reportaron, por el hecho de que una unión del tipo de la que allí se había mostrado,

hubiera sido empleada para la transmisión de señales. Era evidente que aquel era el camino para la obtención de emisión estimulada.

Como los otros grupos a su vuelta en los laboratorios de origen, el de Syracuse se planteó cuál sería el camino adecuado para obtener un dispositivo que llegase a lasear. Muchos dudaban que fuera suficiente con realizar uniones p-n de alta calidad. Algunos señalaban que quizás el camino fuese la introducción en la unión p-n del semiconductor de tierras raras como dopantes; era posible que los mismos establecieran niveles discretos en el interior de las bandas. De esa manera se podrían realizar transiciones equivalentes a las que se tenían en el láser de rubí, recientemente introducido. Esa idea pronto fue rechazada por inviable y se pasó a la correcta: la introducción de la unión p-n en una cavidad, también de forma análoga a lo que se había hecho en el rubí. La posición que tenía en ese momento el grupo de Syracuse se pensaba era bastante ventajosa por el hecho de que, en principio, eran los únicos que sabían cómo realizar uniones p-n en aleaciones de compuestos III-V que tuvieran una anchura de la banda prohibida lo suficientemente grande como para que pudieran emitir en el rojo. Esa longitud de onda era la que Holonyak estimaba era la más necesaria de obtener. La ventaja aparente que pensaban tenían les dio pie para especular sobre la forma más idónea para la realización de la cavidad resonante en el cristal. Holonyak, desde el primer momento pensó en la posibilidad de realizarla mediante tallado y no por simple corte y pulido como parecía lo más evidente. A pesar de ello, por las características de las personas y del trabajo que realizaban, no dejaron apenas ninguna prueba fehaciente que pudiera dar, posteriormente, razón a sus aseveraciones. En 1966, tratando de rehacer la historia, y preguntado por un encargado de patentes de la General Electric sobre el tema, Holonyak únicamente expone en su carta de respuesta, párrafos como el siguiente: *"August, 1962 Hall and I talked about the problem. He told me he was already at work on a GaAs  $\lambda$  diode laser and was going to build a cavity right onto the device by polishing, whereupon I suggested he should cleave. He preferred to polish. I sent him a cleaved GaAs wafer (Tom Seling roomed with me at New Hampshire and will confirm some of my speculations on a possible semiconductor laser"*. La carta continúa haciendo una especie de historia personal de los desarrollos de Holonyak y su grupo desde julio, fecha en la que tuvo lugar la SSDRC de 1962, hasta octubre de ese año.

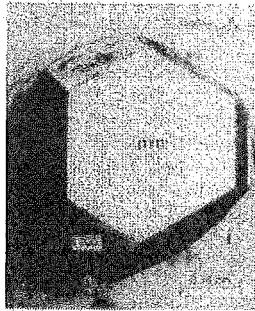
En agosto de 1962 intentó fabricar un láser de Ga(AsP) con material policristalino. Tallar un material de este tipo es casi imposible y, consecuentemente, mucho más difícil que si hubieran intentado conseguirle mediante pulido. En un intento



Polished GaAs - P-N (P-N) junction laser of a GaAs  $\lambda$  diode laser (Zn-diffused p-n junction; VPE n-type crystal) attached via a soft alloy between the two contact leads of a TO-18 header. An etched p-type mesa at the top of the crystal is connected via another soft alloy to an associated Ni lead.

de demostrar las ventajas del tallado sobre el pulido, envié una muestra de GaAs tallada a Hall en octubre, mientras seguía intentando el tallado del Ga(AsP). Casi al mismo tiempo, L. Apker visitó su laboratorio y pudo ver la luz roja de los diodos que había obtenido. Holonyak no tiene idea de la fecha en la que esto tuvo lugar. En su carta al encargado de las patentes señala que quizás pueda saberse mirando los registros de entrada a la GE en esas fechas. Poco después y a través también de Apker, le llegó la noticia de que Hall había

conseguido hacer lasear a su diodo de GaAs. Holonyak se quedó totalmente sorprendido porque pensaba que sería más fácil para él que para Hall ver el laseado de su dispositivo, dado que el suyo emitía en el rojo. No contaba con que Hall lo conseguiría, no mediante sus propios ojos, sino con ayuda instrumental. Ante aquel hecho, y con la casi certeza de que el tallado de su policristal le iba a ser muy difícil, el 9 de octubre decidió, como le escribió al responsable de patentes, "*Oh what the hell, I'll polish a batch*". E inmediatamente obtuvo láseres "rojos", hecho que ninguno de los otros laboratorios en liza había conseguido. Su técnica de pulido, desarrollada con la base de sus pruebas de tallado, era totalmente diferente de la de Hall. A pesar de ello no intentaron sacarla a la luz porque seguían pensando que el método de tallado sería



Single crystal GaAs,  $P_x$  crystal grown via vapor phase epitaxy (VPE), in a closed quartz ampoule, showing well-developed low index {111} and {100} natural facets.

el que tendría más éxito futuro. Y también estaban seguros de que si hubieran pulido desde el principio, su láser hubiera nacido antes que el de Hall. Como luego se comentará, cuando fueron capaces de crecer monocristales de Ga(AsP) el tallado que andaban buscando llegó de forma inmediata.

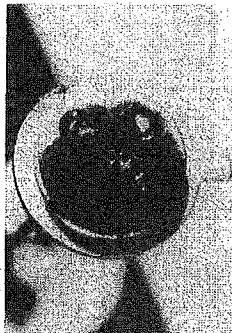
Mientras todo esto ocurría en Syracuse, otros grupos además del de Hall, como ya se ha visto trabajaban también en el mismo tema. Holonyak no se enteró de ello hasta que no vio el artículo de Hall y las referencias que en él hacía. Como comenta, para él y su grupo, el único trabajo significativo que les había influenciado era el de Keyes y Quist. El artículo, por ejemplo, de Bernard y Duraffourg, importante desde un punto de vista teórico, no logró prácticamente excitar la realización de ningún tipo de experiencias posteriores. Al menos al grupo de Syracuse. Desde el punto de vista técnico, solo el trabajo de Rediker y sus colaboradores tenía conexión con el suyo. La difusión de impurezas de Zn en diodos de GaAs de aquel era similar a las uniones p-n difundidas de GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> que eran dopadas degeneradamente tanto en el sustrato tipo n como en la zona p difundida de Zn.

A finales de octubre el grupo de Syracuse hizo una presentación pública de sus resultados. En el grupo de asistentes estaba Rediker. Holonyak parece le hizo una pregunta como la siguiente: "*hat do you think it will require to make a semiconductor laser? Afterall, look how bright these diodes are*". Holonyak no sabía que Rediker conocía ya que, en aquel momento, otro grupo de GE había obtenido un láser de inyección. Lo supo cuando, el 1 de noviembre recibió una copia del artículo de Rediker con una nota que decía "*It was a lot of fun acting dumb in Syracuse with you*". El intercambio de información, en los momentos clave, había sido nulo. Incluso entre los grupos de GE.

<sup>1</sup> N. Holonyak, Jr., D.C. Jilison y S.F. Bevacqua, "Halogen vapor transport and growth of epitaxial layers of intermetallic compounds and compound mixtures", en *Metallurgy of Semiconductor Materials*, Vol. 15, J.B. Schoeder, Ed. New York: Interscience, 1962. (AIME Conf., Los Angeles, CA, Agosto 1961), pp. 49-59.

patentes de la GE, el 4 de octubre de 1962. Los resultados en el policristal no eran, como hemos visto antes, satisfactorios por lo que, tras la llamada de Apker a finales de septiembre o primeros de octubre, se decidió a cortar y pulir las caras.

El primer lote de láseres de  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  con cavidad pulida se consiguió el 9 de octubre de 1962. Para probarlos se pensó que la forma más rápida sería hacerlo en Schenectady, NY, donde Hall había dispuesto el instrumental necesario. El 10 de octubre, se tomaron las primeras medidas, en el diodo que aparece en la foto de la Fig. , y que son las que aparecen el artículo enviado para publicar a continuación<sup>2</sup>. En el libro de registro de actividades de Holonyak, puede leerse (Fig. ) lo que éste escribió al día siguiente y que es un resumen de las pruebas de haber conseguido la acción láser: "Yesterday, at Schenectady, we tried diode # (diffusion run 28) which we assembled here into a plane parallel structure on Tues., Oct 9, 1962 (afternoon, late). And G. Fenner spotted immediately that diode 28 ( $\text{Ga}[\text{As}_{1-x}\text{P}_x]$ ) displayed superlinear photooutput. Subsequent investigation on J. Kingsley spectrum analyzer showed the narrowing that goes with "laser" action (13 Å wide). Then follow-up investigation with G. Fenner's "snooperscope" showed the expected diffraction pattern of a "lasing" pn junction. This diode is the first  $\text{Ga}(\text{As}_x\text{P}_{1-x})$  "lasing" pn junction and was left at the Res Lab for further measurements. These results are quite significant, and portend and indicate very significant things to follow".



First visible-emission GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> diode laser. The first diode is assembled on a TO-18 header (RFB Syracuse, NY, Oct. 9, 1962). (See text and Fig. 3)

El resultado, aunque satisfactorio, fue en realidad frustrante para Holonyak, ya que era claro que Hall había ganado la carrera. Antes de volver a Syracuse, Hall le invitó a cenar en su casa con su familia. En ella le urgió a que enviara inmediatamente los resultados para su publicación. Como, de cualquier manera a lo sumo llegaría en segundo lugar, dado que ya conocía que Hall había enviado su láser a *Physical Review Letters*, le pareció que no tenía mucho sentido la prisa. La carrera ya había concluido. Aquello fue un error significativo, dada la situación en la que estaban los otros grupos. Si hubieran terminado el pulido de las caras del resonador en septiembre, como casi habían hecho, y hubieran tomado unas medidas elementales, como habían hecho otros, en lugar de buscar comprobaciones más rigurosas, el artículo podría haber aparecido en el número de noviembre de *Applied Physics Letters*, como sucedió con el de Nathan. De hecho, Holonyak tuvo noticia poco después de que si en lugar de esperar al principio de la semana para enviar su artículo, lo hubiera enviado al final de la anterior, hubiera sido publicado en noviembre. En lugar de ello apareció en el de diciembre, cuando ya los ecos del nacimiento de los primeros láseres de semiconductor se estaban amortiguando. Como remate a lo anterior, en ese mes de diciembre hubo una gran huelga de diarios en Nueva York que redujo casi a cero la difusión de noticias. Con todo ello, el láser de GaAs recibió todos los honores y el de  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ , que por su emisión en el visible podía haber tenido una mayor publicidad, quedó completamente en el anonimato.

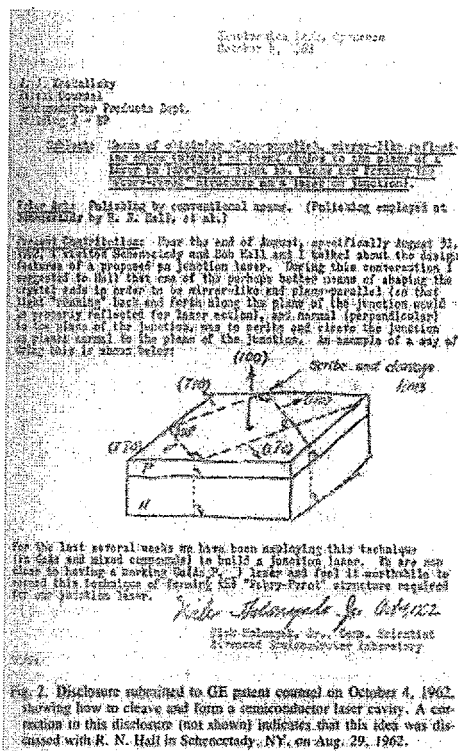
<sup>2</sup> N. Holonyak, Jr. y S.F. Bevacqua, "Coherent (visible) light emission from  $\text{Ga}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)$  junctions", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, pp. 82-83, Diciembre 1, 1962.

### 6.3.- ALGUNAS CONSIDERACIONES ADICIONALES Y TRABAJO POSTERIOR

Un hecho es claro de todo lo anterior. El láser de  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  no fue un subproducto del láser de GaAs, sino que surgió por un camino paralelo en una carrera que empezó en el SSDRC y en el que el propósito de Holonyak fue, desde el principio,

la realización de un láser en el visible. Este hecho dificultaba mucho más el trabajo ya que el resto de los grupos podían trabajar sobre un material, el GaAs, que podía obtenerse directamente de varios fabricantes. En cambio, el GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> era necesario fabricarlo en el propio laboratorio. Las

laboratorio. Las consecuencias de este hecho fueron las vistas de aparecer en un segundo plano. Pero las ventajas posteriores fueron significativas. Durante casi dos años, el grupo de Holonyak tuvieron casi el monopolio en el suministro de ese material. De hecho, los primeros diodos vendidos comercialmente por GE, en diciembre de 1962, por 2.600 \$ la unidad, estaban fabricados en el laboratorio de Syracuse. Unos años después, en 1965, unos diodos equivalentes, también fabricados por el grupo de Holonyak, eran ya ofrecidos por Allied Radio Corporation a la mitad de



ese valor<sup>3</sup>. El precio parece no fue fijado por motivos derivados de coste real de su producción sino de un razonamiento bastante irregular. Texas Instruments vendía emisores incoherentes de GaAs, en el IR, a 130 \$. En GE se pensó que un láser en el infrarrojo debería valer diez veces más, esto es, 1.300 \$ y uno en el visible, el doble que en el IR, 2.600 \$.

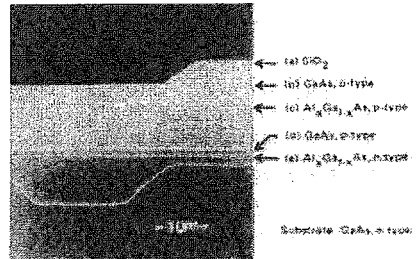
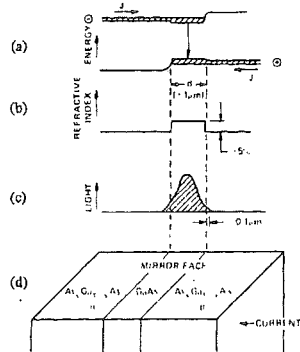
<sup>3</sup> Allied industrial Electronics Cat., num. 650, Chicago, IL, 1965, p. 77.



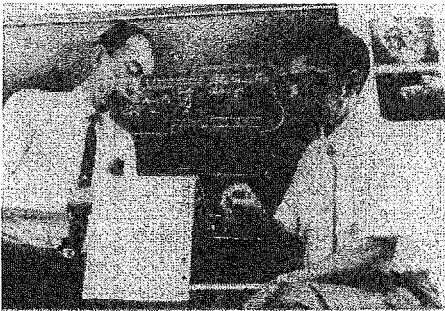
# LÁSER DE SEMICONDUCTOR: DESARROLLO (I)

## EL LÁSER DE HETEROUNIÓN

La principal contribución para el uso de láseres de semiconductor en condiciones normales de trabajo fue hecha por M.B. Panish y su equipo, en los laboratorios de la Bell, a partir de 1967. Para ello introdujeron estructuras de heterounión en las que, debido a un confinamiento más fuerte del campo eléctrico, podía alcanzarse el laseado con corrientes de trabajo mucho más reducidas. La densidad de corriente necesaria, en los primeros láseres fue de unos  $1600 \text{ A.cm}^{-2}$ . En 1969-70 se consiguió que trabajasen a temperatura ambiente.

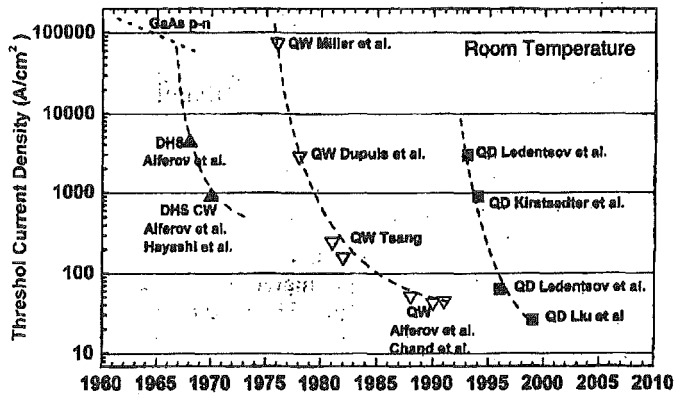


Esquema y estructura física de láser de heteroestructura de



I. Hayashi (left) and M. B. Panish discuss a semiconductor laser designed in 1970 that operates continuously at room temperatures.

I. Hayashi, M.B. Panish y P.W. Foy, "A low threshold room-temperature injection laser" IEEE J. Quantum Electronics, 5,211 (1969)



**ZHORES ALFEROV,**  
**premio Nobel de Física, 2000**

